

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° : ELM-



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par :

BENSEDID TAIEB

BENIA ABDENNOUR

Intitulé

**Etude et Simulation de la Détection par Courants
Foucault de Défauts Internes de Corrosion**

– Cas de Système Bicouches –

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. BOUCHALA Tarik	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021/ 2022

Dédicaces & Remerciements

Dédicaces /

إلى من اجتازت خيول دعواتها حدود السماء، إلى التي أرضعتني الطموح وعلمتني
كيف أكون إنسانا جاد إلى شمعَة البيت وشمعة حياتي أُمي الحبيبة

إلى الذي سقاني المبادئ وعلمني حب الوطن وساندني وسهر على راحتِي أُمي
الحنون

إلى جميع إخوتي وأخواتي دون استثناء أتمنى من الله عز وجل أن يطعمكم الأفرّاح

إلى أستاذي المشرف عبود عبد الحق أتمنى له المزيد من التآلق والنجاح

إلى صديقي في العمل عبد النور بنية وإلى أخوتي صابر رشيد عبد الحق ورفاق
الدرب جلول الطيب، ياسين، رياض. عيسى

إلى يوسف نشنش وإلى جميع أفراد عائلته الكريمة

دون أن أنسى المهندس محمد غادري رئيس قسم البحث والتطوير.

إلى فقيه الرياضة الجزائرية بلال بن حمودة أتمنى من الله أن يتغمده في رحمته
الواسعة.

إلى كل أساتذة كلية التكنولوجيا وقسم الهندسة الكهربائية بجامعة المسيلة

إلى كل من مر على حياتي بطيب في مشواري الدراسي وفي حياتي الخاصة

أهديكم جميعا هذا العمل المتواضع وشكرا

الطيب بن سديد



Dédicaces 2

« Je dédie ce modeste travail : A toute ma famille : ma mère, mon père, mes frères, mes sœurs, et à mon encadreur

Mr Abdelhak ABDOU, et à tous mes amis et proches, et à toute personne ayant contribué à ce travail de près ou de loin. »

[ABDENNOUR BENIA].



Remerciements

Remerciements

Nous remercions DIEU, le Tout Puissant, DIEU qui nous a donné force, Patience, volonté et surtout courage pour élaborer ce travail.

Nous remercions les membres de jury **Pr. BOUCHALA Tarik** et le **Dr BELKHIRI Salah** pour avoir accepté de jugé ce travail.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à Notre encadreur, Dr. ABDOU Abdelhak pour avoir d'abord proposé Ce thème, pour la disponibilité et la patience dont il a fait preuve et Dont les précieux conseils et les remarques pertinentes et pour son Suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions vivement Mrs [Abderrahmane Aboura et Merwane khebal

Et Imad Abdelkrim Pour leurs aident, conseils

Et suggestions tout au long de la période de rédaction de ce mémoire.

Nous sommes aussi redevables à tous les enseignants et personnel

Administratif du département d'Électrotechnique de l'Université de

M'silla, qui ont instaurés un environnement d'entraide et de soutien tant

Au plan scientifique qu'au plan humain.

Résumé

Résumé

Résumé du rapport bibliographique du projet de Mémoire de Master

L'objectif de ce travail est de présenter les principales méthodes de CND avec une explication de leurs avantages et inconvénients et de leurs domaines d'utilisation, en particulier la méthode par courants de Foucault, pour les défauts de corrosion interne dans le cas d'un système binaire - et une description des capteurs les plus couramment utilisés dans ce contexte, ainsi que les équations de Maxwell qui régissent les phénomènes de détection. Au moyen des courants Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur des points généraux concernant la corrosion que nous avons vu conduire à la détérioration du matériau, réduisant l'épaisseur d'origine du métal car la corrosion ne peut souvent pas être détectée par une inspection visuelle, car cela nécessite de couper ou de démonter les tuyaux, la chaudière ou le réservoir. Nous avons constaté que si la corrosion n'est pas détectée pendant une longue période, elle réduira la résistance des surfaces et pourrait causer de graves dommages structurels. Pour des raisons de sécurité et d'économie, nous avons conclu que les structures métalliques doivent être contrôlées régulièrement.

Enfin, nous présentons l'étude théorique d'un système de simulation pour découvrir les défauts internes de corrosion dans le cas d'un système bicouche d'une pièce de plaque électriquement conductrice et expliquons les résultats qui ont été apportés par la méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault. CND-CF

Mots clés : Contrôle Non Destructif (CND), Courants de Foucault, équations de Maxwell, capteur.

Summary of the bibliographic report of the Master Thesis project

The aim of this work is to present the main NDT methods with an explanation of their pros and cons and their areas of use, in particular the eddy current method, for internal corrosion faults in the case of a binary system – and a description of the sensors most commonly used in this context, as well as Maxwell's equations that govern detection phenomena. By means of currents. In this work we focused on general points about corrosion that we have seen lead to deterioration of the material, reducing the original thickness of the metal because corrosion often cannot be detected by visual inspection, as this requires cutting or disassembling pipes, boilers or tanks. We found that if the corrosion is left to run undetected for a long time, it will reduce the strength of the surfaces and potentially cause serious structural failure. For safety and economic considerations, we concluded that metal structures should be checked regularly.

Finally, we present the theoretical study of a system simulation to discover the internal defects of corrosion in the case of a bilayer system of an electrically conductive plate part and explain the results that were made by the non-destructive testing method CND-CF eddy current.

Keywords: Non Destructive Testing (NDT), Eddy currents, Maxwell's equations, sensor.

ملخص التقرير البيليو غرافي لمشروع رسالة الماجستير

الهدف من هذا العمل هو تقديم طرق الرئيسية الاختبارات غير التدميرية مع شرح ايجابياتها و سلبياتها ومجالات استعمالها ، و لا سيما طريقة التيار الدوامية، لأعطال التآكل الداخلي حالة النظام الثنائي – و وصف أجهزة الاستشعار الأكثر استخدامًا في هذا السياق، بالإضافة الى معادلات ماكسويل التي تحكم ظواهر الكشف عن طريق التيارات و ركزنا في هذا العمل على النقاط العامة حول التآكل والذي راينا انه يؤدي بدوره الى تدهور المادة ، وتقليل السماكة الأصلية للمعدن لانه غالبًا ما لا يمكن اكتشاف التآكل عن طريق الفحص البصري ، حيث يتطلب ذلك قطع أو تفكيك الأنابيب أو الغلاية أو الخزان. و توصلنا الى انه إذا تُرك التآكل ليعمل دون أن يُكتشف لفترة طويلة ، فسيقلل من قوة الأسطح ومن المحتمل أن يتسبب في فشل هيكلي خطير. لاعتبارات تتعلق بالسلامة والاقتصادية ، واستنتجنا انه يجب فحص الهياكل المعدنية بانتظام.

وأخيراً نقدم الدراسة النظرية لمحاكاة نظام لاكتشاف العيوب الداخلية من التآكل في - حالة نظام الطبقة الثنائية - لجزء لوحة موصل كهربائياً و شرح النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة طريقة الاختبارات غير التدميرية طريقة التيار الدوامية CND-CF

الكلمات المفتاحية: الاختبار غير المدمر ((NDT))، التيارات الدوامية (CF). معادلات ماكسويل، المستشعر،

Tables des Matières, Figures et Tableaux

Table des matières

Dédicaces1	i
Dédicaces2	ii
Remerciements	iii
Résumé	v
Table des matières	v
Liste des Figures	viii
Nomenclature	x
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur le Contrôle Non Destructif.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique.....	4
I.3. Généralité sur Les contrôle non destructif (CND).....	5
I.4. Champ d'application du contrôle non destructif.....	6
I.5. Défauts et leurs origines	7
I.5.1. Défauts internes	7
I.5.2. Défauts de surface.....	7
I.5.3. Origines des défauts	7
I.5.4. Principe de détection d'un défaut	8
I.6. Les différentes techniques de contrôle non destructif (CND)	9
I.6.1. Ressuage	10
I.6.2. Contrôle d'étanchéité.....	12
I.6.3. Magnétoscopie	12
I.6.4. CND par Courants de Foucault.....	14
I.6.5. CND par CF pulsé.....	16
I.6.6. Analyse vibratoire.....	16
I.6.7. Emission acoustique.....	17
I.6.8. Ultrasons	18
I.6.9. Radiographie	21
I.6.10. Tomographie	23
I.6.11. Interférométrie holographique	26
I.6.12. Interférométrie de Spécule.....	26
I.6.13. Thermographie	28

I.7. Méthodes CND couplées	30
I.7.1. CND électromagnétique acoustique	30
I.7.2. CND Magnéto-optique.....	31
I.8. Conclusion	32
Chapitre II . Modélisation du CND par	34
Courants de Foucault.....	34
II.1. Introduction	34
II.2. Historique	34
II.3. Principe physique CND par CF.....	35
II.4. Objectifs du CND-CF.....	36
II.5. Technique de contrôle par courant de Foucault CND-CF.....	36
II.6. Nature de control par courant de Foucault CND-CF	37
II.7. Modélisation du dispositif de CND-CF	37
II.7.1. Capteur.....	39
II.7.2. Types de capteur	39
II.7.1. Fonctionnes de capteur	42
II.7.2. Bobine.....	44
II.7.3. Mode de contrôle	45
II.7.4. Méthode de résolution	48
II.7.5. Modes excitation.....	52
II.7.6. Control non destructif par courant de Foucault Pulsé	53
II.7.7. Intérêt de la modélisation	55
II.7.8. Formulation en potentiel vecteur-V	55
II.8. Modélisation Mathématique de System CND-CF	56
II.8.1. Relations de continuité et conditions aux interfaces	58
II.8.2. Équations magnétodynamique bidimensionnelle :	61
II.8.3. <i>Conditions aux limites</i> :	63
II.9. Méthode des éléments finis (MEF)	64
II.9.1. Principe de la méthode vibrationnelle	64
II.9.2. Principe de Formulation résidus pondérés.....	65
II.9.3. Organigramme de résolution des EDP spart la méthode des éléments finis	65
II.10. Conclusion :	66
Chapitre III . Simulation d'un Système de détection de défauts internes de corrosion par CND-CF	68

III.1.	Introduction	68
III.2.	Généralités sur la corrosion.....	68
III.2.1.	Risques engendrés par corrosion.....	70
III.3.	Déroulement de Simulation sous COMSOL Multiphasiques	71
III.4.	Résultats des simulations	72
III.4.1.	Création du modèle de simulation.....	72
III.4.2.	Caractéristique du système CND-CF à étudier.....	73
III.4.3.	Effet de variation des paramètres du défaut sur les variations d'impédance	78
III.5.	Balayage surfacique par série de bobines en mode multiplexage	83
III.2.2	Capteurs multiéléments.....	83
III.6.	Conclusion :.....	88
	Conclusion générale	100
	Bibliographie	102

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I. 1 processus de détection des défauts.[2].....	9
Figure I. 2 Principe du ressuage.	10
Figure I. 3 Détection de défauts débouchant par magnétoscopie [11]	13
Figure I. 4Principe de la détection par courants de Foucault [11].	14
Figure I. 5Illustration d'appareillage utilisé pour les courants pulsés, [14].....	16
Figure I. 7 Principe de la détection de la propagation de défauts par émission acoustique, [03]	17
Figure I. 6 Schéma de principe du CND par l'analyse vibratoire.....	17
Figure I. 8Principe des ultrasons par immersion.....	18
Figure I. 9Principe de détection des défauts par ultrasons laser, [8].....	19
Figure I. 10 Photographie et cartographie par ultrasons laser de l'épaisseur d'un panneau composite.	20
Figure I. 11contrôle non destructif par L'Ultrason, [2]	21
Figure I. 12 Illustration du fonctionnement de la radiographie.....	21
Figure I. 13Principe de la Radiographie, [11].....	22
Figure I. 14 Principe de la tomographie, [20].	23
Figure I. 15 Exemple de Principe de la tomographie, [21]. Error! Bookmark not defined.	
Figure I. 16Examen visuel et traces de corps.....	25
Figure I. 17 Principe de l'holographie, [8].....	26
Figure I. 18Principe de l'interférométrie de Spécule, [8].	27
Figure I. 19 Détection et mesure de défauts par sériographie [8]	28
Figure I. 20 Principe du CND par thermographie,[22].	29
Figure I. 21 Principe des palpeurs EMAT.....	30

Chapitre II

Figure II.1 Les lois régissant le contrôle non destructif par CF [6].	35
Figure II. 2 Les objectifs de contrôle par courants de Foucault [20].	36
Figure II. 3 Système capteur-fissure.	38
Figure II. 4 Cas général d'un Problème magnétodynamique [21] [24]	38
Figure II. 5 Classification des capteurs CF [20] [12].....	39
Figure II. 6 Bobine interne avec noyau [23] [26] [19].....	40
Figure II. 7 Bobine encerclante [24]	40
Figure II. 8 Sonde ponctuelle [26] [23] [19]	41
Figure II. 9 Bobine plate, [23] [19]	41
Figure II. 10 Capteur à double fonction, [19].	42
Figure II. 11 Capteur à fonction séparée , [19].	43
Figure II. 12 Quelques exemples de photos de capteurs, [14] [12].....	43
Figure II. 13 Etapes de réalisation des bobines micro moulées, [12].[19].....	44
Figure II. 14 Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de Katona souple.....	45

Figure II. 15 Sonde absolue, [6].....	46
Figure II. 16 Mesure absolue compensée [24]	47
Figure II. 17 Sonde différentielle, [26].	47
Figure II. 18 (a). Perturbation du signal d'alimentation, (b) Courbe Lissajous, [26].	48
Figure II. 20 Bobine avec noyau au-dessus d'un demi-espace conducteur. [26].....	49
Figure II. 19 Géométries axisymétriques traitées par Dodd et Deed. [26].....	49
Figure II. 21 Chaîne de contrôle par courants de Foucault pulsé, [25]	55
Figure II. 22 Potentiel A dans les différentes régions. [12]	61
Figure II. 25 Organigramme de calcul par élément finis, [2].....	66

Chapitre III

Figure III.1 Schéma d'emplacement de corrosion	69
Figure III.2 Exemple de CND-CF pour la détection de défauts de corrosion.....	70
Figure III.3 Recherche de défauts de corrosion au voisinage des soudures de pipe line	71
Figure III.4 Vue de l'Interface utilisateur de COMSOL5.6, [21].	72
F Figure III.5 Création du modèle géométrique.[21]	72
Figure III.6 Défaut de corrosion interne 10*4*0.6mm au fond 1 ^{ère} couche.....	73
Figure III.7 Vue de la position défaut corrosion.	74
Figure III.8 Maillage du domaine d'étude	75
Figure III.9 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.	76
Figure III.10 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.	76
Figure III.11 Cartographie des courants induit « sans défaut »	77
Figure III.12 Cartographie des courants induit « défaut externe»	77
Figure III.13 Cartographie des courants induit « défaut interne»	77
Figure III.14 Effet de variation de la longueur du défaut sur Z Réelle	78
Figure III.15 Effet de variation de la longueur du défaut sur Z imaginaire.	79
Figure III.16 Effet de variation de la position du défaut sur Z imaginaire.	80
Figure III.17 Effet de variation de la position du défaut sur Z Réelle.	80
Figure III.18 Effet de variation de la fréquence sur Z imaginaire.....	81
Figure III.19 Effet de variation de la fréquence sur Z imaginaire.....	81
Figure III.20 Positions des défauts de largeurs différentes (1, 2 et 4mm)	82
Figure III.21 Effet de variation de la largeur et la position sur Z imaginaire.	83
Figure III.21 Balayage d'un capteur mono-élément et multiéléments.....	84
Figure III.23 Modèle géométrique « multiéléments en mode de mutliplaxage ».	84
Figure III.24 Vue de la position de défauts 2	85
Figure III.25 Vue de position de défauts 3.....	85
Figure III.26 Maillage domaine d'étude « multiéléments en mode de mutliplaxage .	86
Figure III.27 Zoom du Maillage domaine d'étude « multiéléments en mode de mutliplaxage.	86
Figure III.28 Imagerie 3 D de réactance	87
Figure III.29 Imagerie 3 D de résistance	87

Nomenclature

Acronymes

CND	Contrôle Non Destructif
END	Evaluation Non Destructif
CF	Courants de Foucault
CND-CF:	Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault
CCF:	Capteur par Courants de Foucault.
CM	Capteur Magnétique.
MEF	Méthode des Eléments Finis.
MCC	Méthode des Circuits Couplés.
2D	Bidimensionnel.
3D	Tridimensionnel.

Symboles

A	Potentiel Vecteur magnétique	(Tm)
B	Induction magnétique	(T)
D	Induction électrique	(C/m ²)
E	Champ électrique	(V/m)
<i>f</i>	Fréquence	(Hz)
H	Champ magnétique	(A/m)
I :	Intensité de courant électrique	(A)
J	Densité de courant	(A/m ²)
J _s :	Densité de courants surfaciques	(A/m ²)
<i>t</i>	temps	(s)
U :	Tension aux bornes du capteur	(V)
V	Potentiel scalaire électrique	(V)
Φ	Potentiel scalaire magnétique	(T.m)
ω	Pulsation électrique	(rad/s)
σ	Conductivité électrique	(S/m)
σ _p :	Conductivité électrique de la pièce	(S/m)
ρ	Résistivité électrique	(Ω.m)
δ	Épaisseur de peau	(m)
μ ₀	Perméabilité magnétique absolue du vide	μ ₀ = 4π × 10 ⁻⁷ H m ⁻¹
μ _r	Perméabilité magnétique relative	
ε ₀	Permittivité électrique absolue du vide	36π10 ⁻⁹ (F/m)
ε _r	Permittivité électrique relative	
R	Résistance électrique	(Ω)
ΔR	Variation de la résistance	(Ω)
L	Inductance propre	(H)
X	Réactance	(Ω)
X _n	Réactance normalisée	
ΔX:	Variation de la réactance	(Ω)
Z	Impédance	(Ω)
ΔZ :	Variation de l'impédance	(Ω)
S :	Surface	(m ²)

Introduction Générale

Introduction générale

L'objectif visé par ce travail est une Etude et Simulation de la Détection par Courants Foucault de Défauts Internes de Corrosion Cas de Système Bicouches

Les Contrôles Non Destructifs (CND) spécifient l'ensemble des procédés qui permettent de caractériser une structure ou un matériau sans altérer son intégrité. L'utilisation de ces procédés intervient à différentes étapes du cycle de vie du produit, que ce soit lors de sa fabrication, de son utilisation ou lors d'opérations de maintenance, le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut toujours être réalisé à trois étapes différentes de son cycle de vie, lors le processus de fabrication, en réception et en service. [1]

Toute détérioration d'un matériel en fonctionnement due à des fissures est un accident aux conséquences potentiellement graves. La gravité de ces accidents peut varier, d'une part la dégradation des équipements suivie de la mise hors service de machines ou d'installations temporaires ou permanentes et les pertes économiques qui en découlent, d'autre part la gravité peut être plus grave car elle aussi peut entraîner des accidents et des pertes de vie, principalement dans des domaines à haut risque tels que le nucléaire ou l'aviation. La possibilité d'accidents dus à des fissures non détectées nécessite l'utilisation de la technologie (CND).

Dans l'industrie, les techniques de contrôle non destructif (CND) sont passées de la maintenance préventive à la caractérisation des matériaux d'une part, et au contrôle qualité des produits fournis aux consommateurs d'autre part, la « qualité » étant devenue un impératif crucial pour faire face aux Entreprises avec la concurrence internationale et des clients de plus en plus exigeants. Tout cela démontre l'intérêt de mener des recherches approfondies sur les contrôles non destructifs, [2].

Étant donné qu'une grande partie des équipements industriels est constituée de matériaux conducteurs, l'utilisation des contrôles non destructifs par courants de Foucault (CND-CF) est une étape nécessaire dans la détection des défauts.

C'est dans ce contexte que la problématique de ce travail est abordée par modélisation et simulation à l'aide du logiciel COMSOL Multiphasiques.

Ce mémoire comportera trois chapitres structurés comme suit :

- Dans Le premier chapitre On a présenté le Généralités sur le Contrôle Non Destructif et avec plus de détail Les différentes techniques de CND et de leurs avantages, inconvénients et domaines d'application*
- Le deuxième chapitre est partagé en deux parties ; la première partie sera dédiée au capteur inductif, les paramètres qui influent sur le contrôle, la mise en œuvre, c'est-à-dire aux différents types*

De sondes, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle, par contre la deuxième partie sera consacrée aux rappels des principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique (équation de Maxwell) pour formuler les équations en régime de la magnétodynamique, ces équations sont des équations Différentielles aux dérivées partielles dont la solution dépend entièrement des conditions aux limites.

- *Quant au troisième chapitre sera consacré à une étude généralisées sur la corrosion, on présentera les dispositifs à étudier, plaque avec défauts internes, ainsi que les caractéristiques géométriques et physiques. Pour clôturer ce chapitre nous présenterons les résultats de simulation pour un balayage linéaire et un balayage surfacique de système par multi capteurs en mode multiplexage avec les interprétations appropriées.*
- *Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués et les perspectives à envisager.*

Chapitre I :

Généralité sur les Techniques de CND

Chapitre I. Généralités sur le Contrôle Non Destructif

I.1. Introduction

L'histoire des essais non destructifs END commence avec celle de la physique moderne à la fin du XIXe siècle. Le contrôle non destructif est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industrie pétrolière, nucléaire, et automobile. Car vu la gravité des conséquences d'une rupture d'une tige en cours de forage, ou d'un tube de cuvelage ou de production,

Le CND présente un spectre disciplinaire très large et il joue un rôle crucial dans le contrôle de qualité de produit en cours de fabrication en s'assurant par exemple qu'une soudure est de bonne qualité. Il est aussi utilisé pour le suivi de l'état d'un matériel en cours d'utilisation, lors d'opérations de maintenance ou μ a la suite de détection d'anomalies de comportement, afin de localiser et caractériser des défauts,

Dans ce chapitre, en premier lieu nous présenterons le but essentiel ou bien l'objectif principal du contrôle non Destructif et Les domaines d'application actuel .et nous présentons les différentes techniques de CND existantes, en rappelant leur principe, leurs avantages et inconvénients. Etant donné, que notre recherche est axée sur la technique par courants de Foucault, cette méthodologie d'inspection sera présentée de manière détaillée du point de vu phénoménologique et technologique.

I.2. Historique

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif (CND) constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des CND s'est manifestée ensuite vers les années 1960/1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que l'industrie automobile, l'aéronautique civile et le génie des centrales électriques nucléaires. Les dernières décennies enfin, voient l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique [5]

Globalement, en tant qu'outil majeur de la politique qualité d'une entreprise, les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue,

il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le localiser et le caractériser. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou des irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans des composites, des variations de texture ou de rugosité sur une surface, des variations de propriétés électromagnétiques sur une bande. Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre car les lois de la physique sont ce qu'elles sont et ainsi, dans ce domaine, les progrès sont lents. Il n'en va pas de même pour l'automatisation des CND qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes. L'évolution des CND doit prendre toutefois en compte l'aspect coût, ce dernier pouvant freiner l'essor de nouvelles techniques très performantes [5],

I.3. Généralité sur Les contrôle non destructif (CND)

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Celui-ci correspond à la détection et la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques. Aujourd'hui, on assiste à une demande très importante et généralisée, émanant de tous les secteurs industriels comme l'industrie automobile, aéronautique, pétrolière, navale et nucléaire. La qualité est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante [5], Cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées. Elle joue un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance.

Cette procédure de contrôle se produit souvent soit en cours de fabrication ou au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

- **La reproductibilité** : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- **La fiabilité** : le contrôle doit remplir son cahier des charges, il doit détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.
- **La possibilité d'inspection globale et locale** : il s'agit de la manière dont l'inspection est réalisée. Soit la technique permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois, on parle d'une inspection globale, ou juste d'une partie de celle-ci, ce sera alors une inspection locale.
- **La sensibilité** : il s'agit du rapport entre les variations de la mesure et la grandeur que

l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur mesurée sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

- **La rapidité d'exécution** : il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant au niveau des coûts et qu'il puisse s'intégrer dans un cycle de production.
- **Le coût** : le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- **La résolution** : la résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détectée, par exemple la dimension du plus petit défaut. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite [7]

I.4. Champ d'application du contrôle non destructif

À travers son objectif, le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits, les structures de toutes natures. À l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup. On recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire). Les secteurs où le CND présente un intérêt majeur peuvent être résumés en [5] :

- **Industries de production** : métaux, polymères, céramiques, verres, composites à matrices organiques, métalliques ou céramiques, structures complexes, pièces de fonderie, ...
- **Industries du transport** : ferroviaire, automobile, naval, aéronautique, aérospatial
- **Industries Agro-alimentaires** : fruits, légumes, confiserie, ...
- **Industries énergétiques** : stockage et transport de l'eau, du gaz, du pétrole,
- **Génie Civil** : ponts et chaussées béton, béton armé, bâtiments divers, centrales nucléaires, État des routes
- **Industries du bois et du papier** : planches, meubles, constructions, cartons,
- **Médical** : contrôle de tout le corps humain (poumons, dents.) par échographie, radiographie,

I.5. Défauts et leurs origines

Différentes méthodes ont été mises au point afin de pouvoir remplir les contraintes dues à la nature du défaut recherché, de la pièce à contrôler (rivetée, soudée, laminée, de forme complexe,) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en recette, en service).

Les défauts recherchés peuvent être classés en deux grandes catégories : les défauts surfaciques et les défauts internes [4]

I.5.1. Défauts internes

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agisse de pièces moulées, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans l'industrie des métaux il peut s'agir par exemple de porosité, de soufflures ou d'inclusions. Dans tous les autres cas, il peut s'agir de la présence d'un corps étranger au sein d'une pièce ou d'un produit. Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office.

I.5.2. Défauts de surface

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'oeil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- *Défauts ponctuels* correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puis qu'il s'agit des criques, fissures et craquelures généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault).
- *Défauts d'aspect* correspondent à une variation de paramètres géométriques ou physiques qui rend le produit inutilisable (rugosité, taches diverses). Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [7][4]

I.5.3. Origines des défauts

Les origines des défauts sont multiples selon les domaines étudiés. Plusieurs critères peuvent être pris en compte lors de leur classification. Dans la suite, nous allons citer deux classifications qui sont généralement adoptées et englobent toutes les origines possibles des défauts. Il s'agit des origines des défauts suivant leur phase d'apparition et selon l'environnement et la nature du spécimen inspecté [1],

Phase d'apparition Dans la littérature, les causes des défauts peuvent être répertoriées suivant leur phase d'apparition en :

- **Défauts de fabrication** : Ce sont des défauts générés par les différents procédés de construction ou d'assemblage. On trouve des défauts de forme, d'inclusions, de porosités, de fissurations, de moulage, de soudage ou de brasage des pièces mécaniques. On trouve également des hétérogénéités dans les matériaux et des défauts de collage.
- **Défauts de service** : Ce sont des défauts qui apparaissent dans des structures au cours d'utilisation, comme des fissures dues à la fatigue (mécanique ou thermique), défauts de collage et de fixation, corrosion et délaminage pour les composites,

Selon l'environnement et la nature du spécimen inspecté il est possible également de faire une classification selon l'environnement et la nature du spécimen inspecté :

- **Matériaux solides** : porosités, microfissures, fissures, délaminages, corrosion, défauts de collage, décohésion fibre-matrice, ...
- **Assemblages** : défauts de soudure, de collages, de serrage de boulon, d'ajustement
- **Structures et constructions** : corrosion sur les rails de chemins de fer, dans les armatures de bétons armés, dans les canalisations de transports de fluides. Fissuration des ponts et des bâtiments, ...
- **Nourriture** : géométrie, pépins, pour les fruits ou légumes Trous, géométrie pour les bonbons, sucettes, ...
 - **Corps humain** : fêlure, fissures ou rupture d'un os, malformation d'un fœtus ...
 - **Sol terrestre** : Cavités cachées, fissures, nappes d'eau asséchées, composition des couches terrestres, [5][7]

I.5.4. Principe de détection d'un défaut

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter une hétérogénéité dans un matériau.

Les phénomènes physiques comme l'atténuation ou diffraction des rayons X, réflexion ou diffraction des ultrasons, perturbation des courants de Foucault, sont à la base des essais non destructifs où ils peuvent servir à caractériser les matériaux (présence de fissures...). En effet, par CND on sous-entend toujours qu'il ne s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité.

Les techniques du CND diffèrent généralement par l'énergie employée : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, courants de Foucault.) ou thermique (thermographie infrarouge...). Cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection des défauts est généralement mis en place. Il est constitué de deux étapes principales (figure 1.1) : la détection et la localisation des défauts (décider que le

ystème est en défaut ou non et déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification (estimer l'ampleur et le type des défauts). [7]

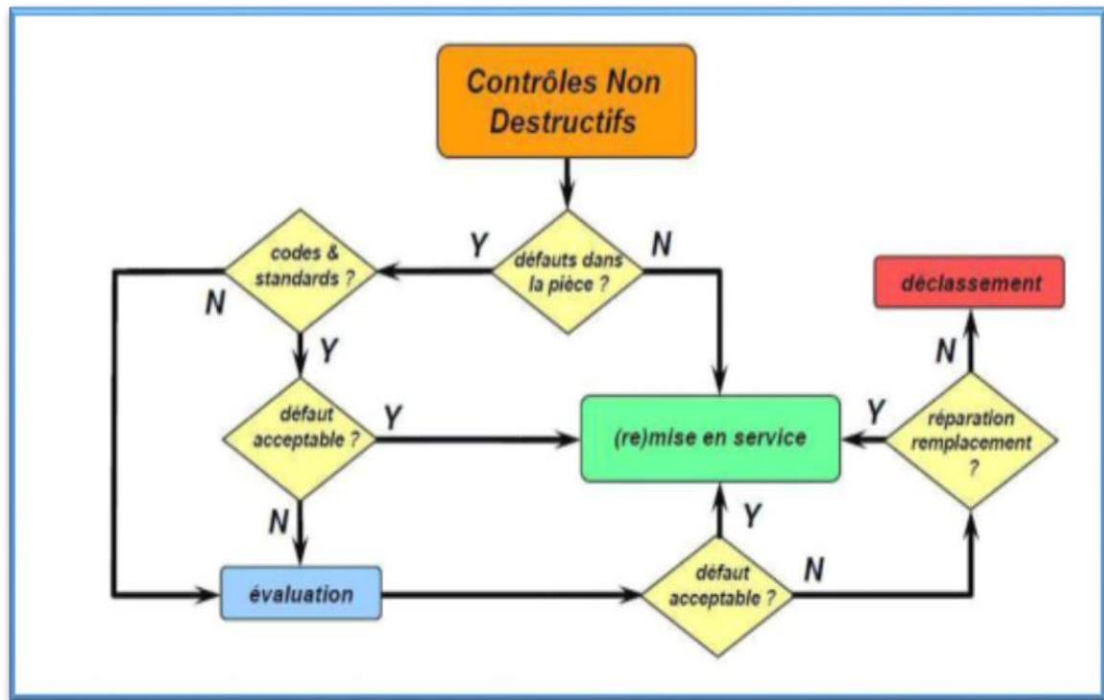


Figure I. 1 processus de détection des défauts.[2]

I.6. Les différentes techniques de contrôle non destructif (CND)

Les techniques de CND utilisées sont diverses : la radiographie, les ultrasons, le ressuage, la thermographie, les courants de Foucault... Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme,). du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur). Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Les différentes familles de CND sont représentées : les courant de Foucault (40%), les ultrasons (40%), la radiographie, le ressuage, la thermographie (20%), [18].

I.6.1. Ressuage

Cette ancienne méthode révèle la présence de discontinuités ouvertes en surface (rayures, microfissures). Elle est applicable à tous les matériaux non poreux et met en évidence des discontinuités jusqu'à 1 μm d'ouverture. Cette méthode simple d'utilisation se décompose en trois étapes, tel que schématisé en Figure 1.2 :

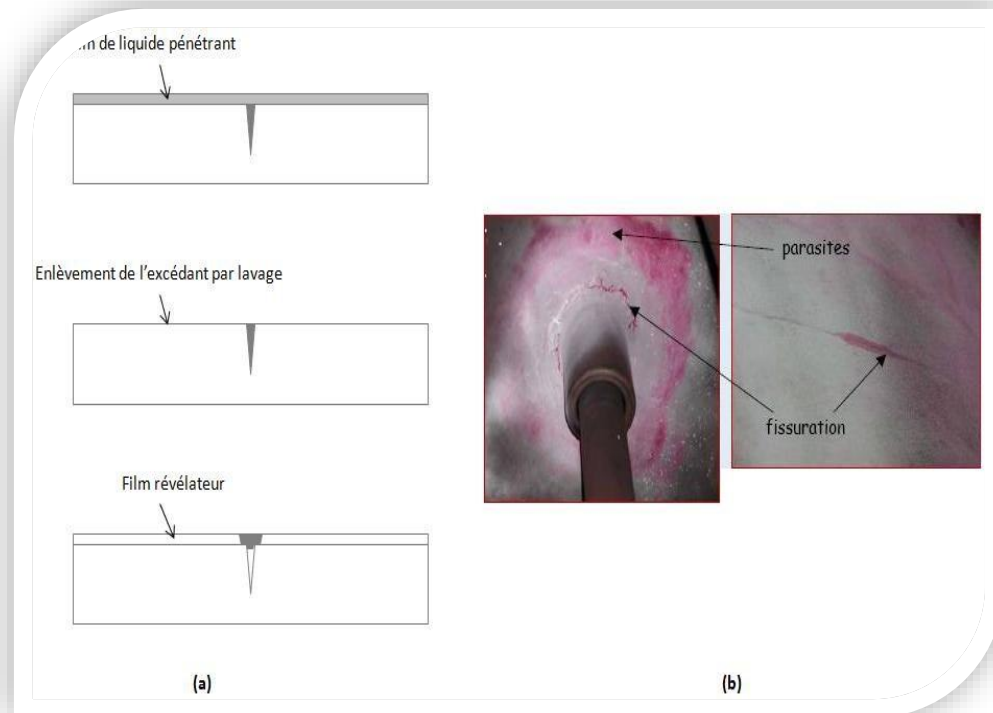


Figure I. 2 Principe du ressuage.

(a) Protocole expérimental de ressuage ; (b) Défaut mis en évidence par le ressuage

- Tout d'abord, un liquide dit « pénétrant » à faible tension superficielle et contenant des pigments visibles est appliqué à la surface du matériau au moyen d'un pinceau ou d'une bombe aérosol. Ce liquide pénètre par capillarité dans tous les interstices constitués par les défauts débouchant à la surface de la pièce.
- Après un certain temps d'attente, l'enlèvement de l'excédent est réalisé par lavage à l'eau ou par un solvant ou un chiffon.
- Puis, on applique un produit révélateur qui agit comme un buvard. Après quelque temps, le liquide retenu dans les défauts débouchant est absorbé par capillarité (d'où le terme de ressuage). L'apparition d'une tâche colorée révèle la présence d'un défaut comme la montre la Figure 1.2-b.

Cette méthode est peu coûteuse, sa sensibilité de détection de défauts débouchant est bonne. Toutefois, il est impossible de détecter des défauts en profondeur. De plus, il faut s'assurer que la surface de la pièce soit propre et bien dégraissée. Enfin, cette méthode est liée à l'utilisation de produits nocifs, inflammables ou volatiles peu respectueux de l'environnement. Enfin, ils sont souvent mal adaptés aux matériaux composites puisqu'ils peuvent parfois dégrader les matrices polymères. [8]

1.6.1.a. Application

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant. Le ressuage est une méthode que l'on peut utiliser à la fois pour le contrôle de pièces de sécurité en petite ou moyenne série et en contrôle de pièces à l'unité, au cours de leur fabrication ou au cours des opérations de maintenance,

1.6.1.b. Avantage

- Procédé de contrôle économique ;
- Procédé de contrôle relativement rapide ;
- Bonne sensibilité de détection des défauts débouchant avec appréciation de leur longueur ;
- Détection possible de petit défaut ;
- Procédé insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface ;
- Utilisable sur les matériaux amagnétiques à l'inverse de la magnétoscopie ;
- Possibilité d'automatisation du procédé,

1.6.1.c. Inconvénient

- Détection de défaut obligatoirement débouchant sur une surface ;
- Accès d'un seul côté pour les éléments aux de faible diamètre ;
- Impossibilité de contrôle les matériaux poreux ;
- La surface à contrôle ne doit être expérimentes pour certain technique ;
- Impossible de révéler les défauts internes et obstrues ;
- Gestion des déchets liquides rejetés à l'egnot, [9].

I.6.2. Contrôle d'étanchéité

Les contrôles d'étanchéité servent à prouver et/ou à déceler une fuite de gaz ou de liquide à travers la paroi d'une enceinte. Ils permettent donc de détecter les défauts traversant (trou, élément perméable dans la paroi) de la pièce les tubes et les enceintes en tous types

Les contrôles d'étanchéité sont utilisés pour examiner les tubes et les enceintes en tous Types de matériaux dans des secteurs industriels très variés tels que la pétrochimie (contrôle des réservoirs, cuves, canalisations), l'aéronautique (réservoirs), le nucléaire (enceintes de confinement, circuits de tuyauteries et cuves) ou l'agroalimentaire (contrôle des emballages) [23]

I.6.3. Magnétoscopie

Cet examen consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique jusqu'à sa saturation. Ce champ se trouve dévié s'il rencontre un obstacle sur son parcours. Si cet obstacle est proche de la surface, les lignes de force du champ peuvent sortir à l'extérieur de la pièce en créant à l'endroit du défaut une sorte de mini aimant sur les pôles duquel peut s'accumuler une poudre magnétique très fine préalablement déposée (utilisée à sec ou en suspension dans un liquide). La Figure 1.3 montre la détection de défauts débouchant par magnétoscopie [10].

Pour être révélés, les défauts doivent être perpendiculaires aux lignes magnétiques (ils sont indécélables par cette technique lorsqu'ils sont parallèles aux lignes de champ).

L'utilisation d'un courant continu pour l'aimantation autorise une profondeur de détection jusqu'à quelques millimètres (environ 5 mm) tandis que l'utilisation d'un courant alternatif donne des champs importants (surtout en surface) qui ne permettent donc de détecter que des défauts débouchant.

Cette méthode simple et rapide permet de détecter facilement des défauts débouchant et su surfaciques. De plus, elle possède une très bonne sensibilité de détection de défauts plans. Toutefois, la magnétoscopie ne permet pas de détecter des défauts vraiment en profondeur. De plus, la détection des défauts non linéaires est moyenne.

La magnétoscopie est une méthode applicable uniquement aux pièces ferromagnétiques pour lesquelles les pièces peuvent être aimantées par passage de champ ou par passage de courant.

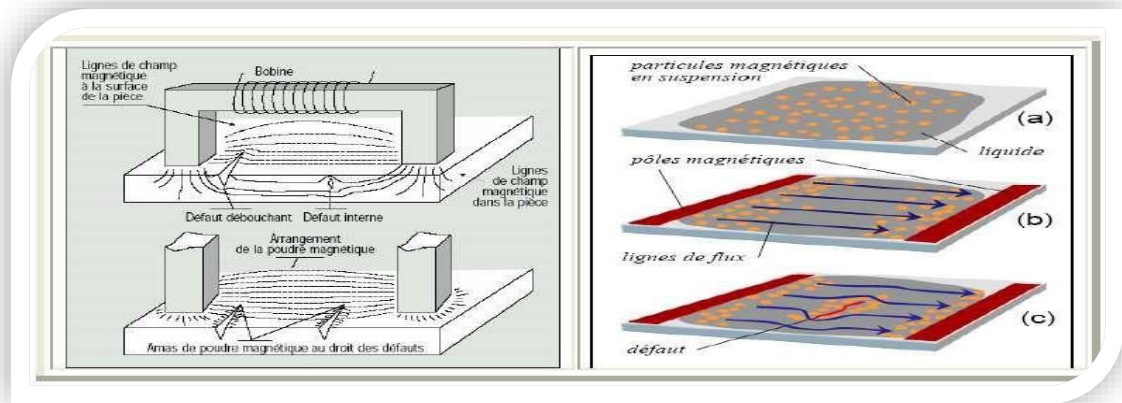


Figure I. 3 Détection de défauts débouchant par magnétoscopie [11]

1.6.3.a. Application

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de densité débouchant en surface

- Dépièces moulées : criques situés entre le raccordement, réseaux de fissures superficielles. Des pièces forgées : criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement.
- Les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables à être détectées.
- Les fissures de corrosion sous tensions sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique de soudures, [18].

1.6.3.b. Avantages

- Procédé de contrôle économique ;
- Méthode de mise en œuvre plus rapide que le contrôle par ressuage ;
- Facilité de détection des défauts débouchant et immédiatement sous-jacents (à 2mm maximale) ;
- Les défauts peuvent être ont obstrués ;
- Rapidité et relative d'obtention des résultats ;
- Possibilité d'apprécier la longueur des défauts ;
- Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculairement au champ,

1.6.3.c. Inconvénients

- Méthode de contrôle exclusivement réserve aux matériaux ferromagnétiques ;
- Impossible de détecte des défauts en profondeur (> 2mm de profondeur) ;
- Aimantation difficile des pièces à géométrie complexe ;
- Risque électrique par direct de courant ;

- Risque de microfissuration sur certains aciers sensibles ;
- Démagnétisation obligatoire après contrôle, [18] [9].

I.6.4. CND par Courants de Foucault

Cette méthode est largement utilisée pour détecter les défauts de surface, pour trier les matériaux, pour mesurer des parois minces à partir d'une seule surface, pour mesurer des revêtements minces et dans certaines applications pour mesurer la profondeur. [2]

Cette méthode ne s'applique qu'aux matériaux électriquement conducteurs. Dans la méthode, des courants de Foucault sont produits dans l'objet conducteur. Ces courants, appelés courants de Foucault (CF), créent un champ magnétique induit opposé au champ d'excitation. Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable crée un champ magnétique variable et, placée en vis-à-vis d'un objet conducteur, donne lieu au phénomène des CF. Le flux magnétique créé par les courants induits modifie la force électromotrice de la bobine et l'analyse de cette variation fournit les informations exploitables pour le contrôle de l'objet. Dès qu'ils rencontrent une fissure, une inhomogénéité, un changement de géométrie, les lignes de courants induits sont déviées, ce qui entraîne une modification du champ de réaction.

La difficulté réside dans le fait que les courants de Foucault ne sont pas directement mesurables ; seul le champ magnétique qu'ils génèrent l'est. Cette méthode, comme les autres

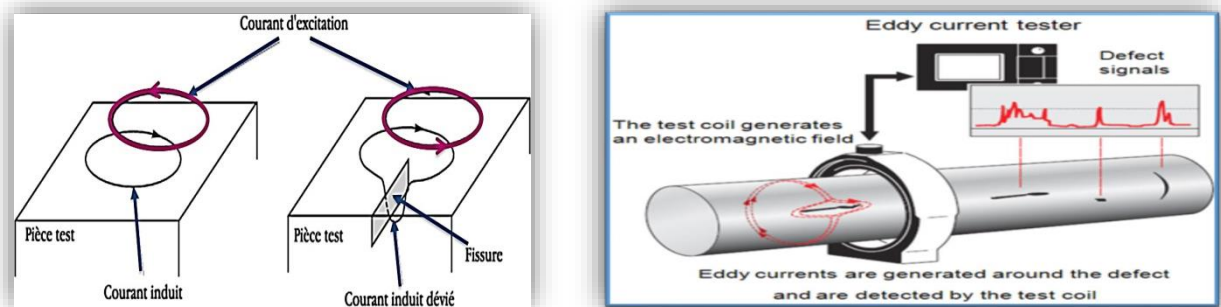


Figure I. 4 Principe de la détection par courants de Foucault [11].

D'ailleurs, nécessite donc une analyse mathématique poussée pour lier/corréler les caractéristiques du défaut à ce champ magnétique de façon à réaliser une imagerie du défaut et non pas une imagerie de champs. [2].

I.6.4.a. Application

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisés pour effectuer les opérations suivantes :

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques,
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau.
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...).
- Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...).
Suivi d'installations et de matériels en service.
- Mesure d'épaisseur. [22] [29] [4]

1.6.4.b. Avantages

- Grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales...), avec possibilité d'en évaluer la profondeur
- Aucun inconvénient relié à l'environnement ou à la sécurité, [1].
- Ne nécessite pas de couplant.
- Il donne une réponse instantanée.
- A des étapes simples lors de la configuration.
- Est extrêmement sensible aux défauts.
- Est très reproductible.
- Des vitesses de numérisation élevées peuvent être utilisées.
- Est très précis pour l'analyse dimensionnelle des défauts ou de l'épaisseur du revêtement.

1.6.4.c. Inconvénients

- Méthode utile que pour les défauts externes seulement ;
- Limité aux matériaux conducteurs d'électricité ;
- Sensible à de nombreux paramètres dont il faut maîtriser la variation, [1].
- La théorie nécessite une bonne formation académique en électricité et en mathématiques.
- Extrêmement sensible aux variations de surface et nécessite donc une bonne surface.
- Elle s'applique uniquement aux matériaux conducteurs.
- Peut être utilisé sur des matériaux non magnétiques et magnétiques mais n'est pas fiable sur l'acier au carbone pour la détection des défauts souterrains.
- Sa profondeur de pénétration est limitée.
- Orientation du courant de Foucault vers une fissure ou une discontinuité linéaire affectera la détectabilité. [2].

I.6.5. CND par CF pulsé

L'utilisation de courants pulsés conduit à une technique particulière en courants de Foucault, qui consiste à exciter la bobine sonde par des impulsions plutôt que par une tension sinusoïdale entretenue.

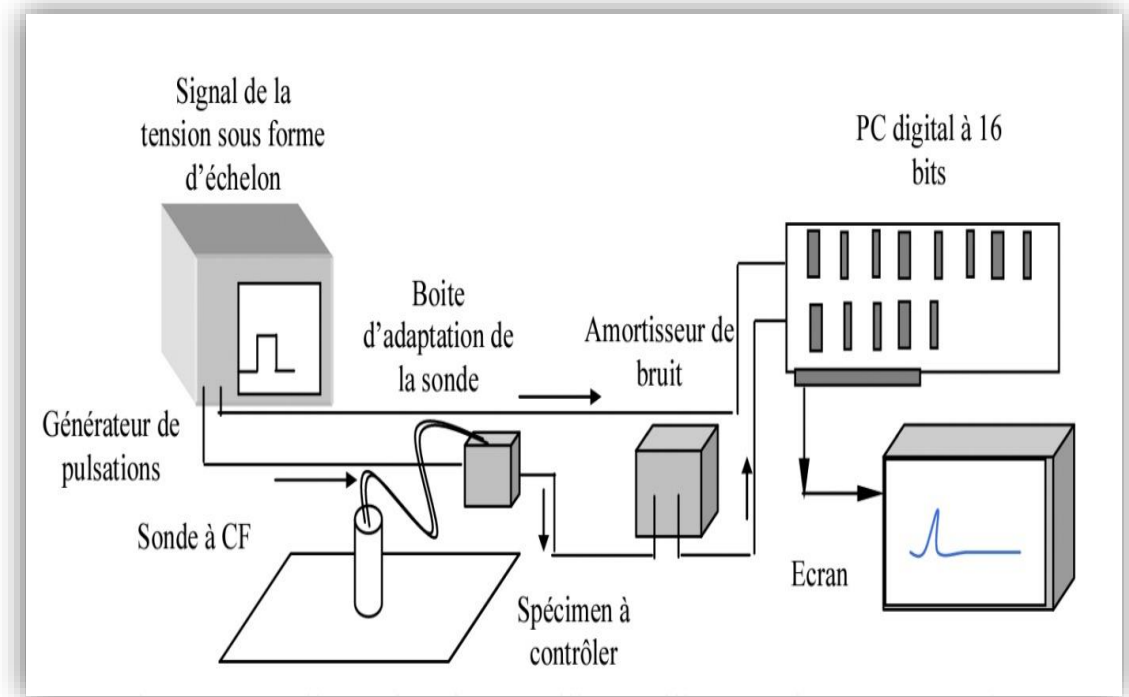


Figure I. 5 Illustration d'appareillage utilisé pour les courants pulsés, [14]

L'onde électromagnétique ainsi engendrée se propage dans le matériau et est recueillie par une sonde réceptrice distincte et protégée du rayonnement direct de la bobine émettrice, le caractère « pseudo-échographique » des signaux les rend sensibles à la nature interne du matériau, se qui explique que cette technique est utilisée pour la mesure d'épaisseur des revêtements et pour la détection de défauts sous-cutané. La figure 1.5 illustre l'appareillage utilisé pour l'effectuation de cette technique, [14].

I.6.6. Analyse vibratoire

Applicable à tous types de matériaux, l'analyse vibratoire [15] consiste à analyser les oscillations mécaniques d'un système autour d'une position de référence. Ces oscillations peuvent être créées par des sollicitations extérieures ou par le système lui-même.

Après avoir enregistré le signal, l'état mécanique du système est déterminé à partir des descripteurs utilisés durant la phase de traitement du signal.

Bien que cette méthode soit simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, elle n'apporte pas d'information sur la localisation et la taille des défauts. L'utilisateur sait ainsi juste s'il doit réaliser ou non un examen plus approfondi de la pièce.



Figure I. 6 Schéma de principe du CND par l'analyse vibratoire

I.6.7. Emission acoustique

Cette méthode passive est utilisée pour suivre des propagations de défauts dans un matériau suite à une sollicitation par contrainte thermique, mécanique, chimique... Un train d'ondes élastiques est créé à chaque propagation du défaut, ce train se propageant ensuite dans tout le matériau. Ces ondes sont détectées par un capteur piézoélectrique puis amplifiées. Cette technique permet une évaluation globale de l'intégrité de la pièce (Figure 1.7). Il est aussi possible par triangulation de localiser le défaut dans la pièce [16].

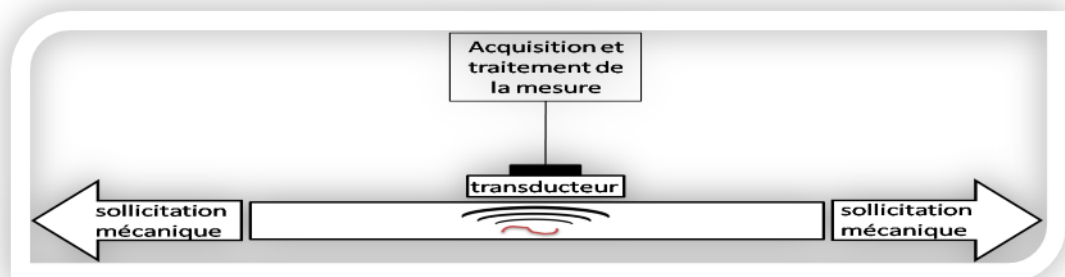


Figure I. 7 Principe de la détection de la propagation de défauts par émission acoustique, [03]

I.6.8. Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques ayant des fréquences oscillatoires supérieures à 20kHz et pouvant aller jusqu'à plusieurs MHz. Celles-ci sont produites par effet piézoélectrique par des transducteurs, et introduites dans le matériau à inspecter via un fluide de couplage. L'onde ultrasonore est en partie réfléchi à chaque fois qu'elle rencontre un changement brutal de milieu (bords supérieur et inférieurs d'une plaque, défauts...). La réception du signal réfléchi peut être réalisée de deux manières : soit le transducteur émetteur sert aussi de récepteur, soit un autre palpeur convertit le signal mécanique réfléchi en un signal électrique. Dans ce dernier cas, on parlera de méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction)

La fréquence d'utilisation des transducteurs, comprise entre 0.5 MHz et 10MHz, ne permet pas un bon couplage avec l'air. Le couplant peut en revanche être de l'eau, on parle alors d'essai en immersion (la pièce à inspecter est alors complètement immergée dans un bassin) pour analyser une grande partie de la pièce (Figure 1.8), ou un gel pour des palpeurs en contact avec le matériau pour contrôler une zone bien précise.

Temps correspondant à la profondeur de défaut

Temps correspondant à l'épaisseur totale de la plaque

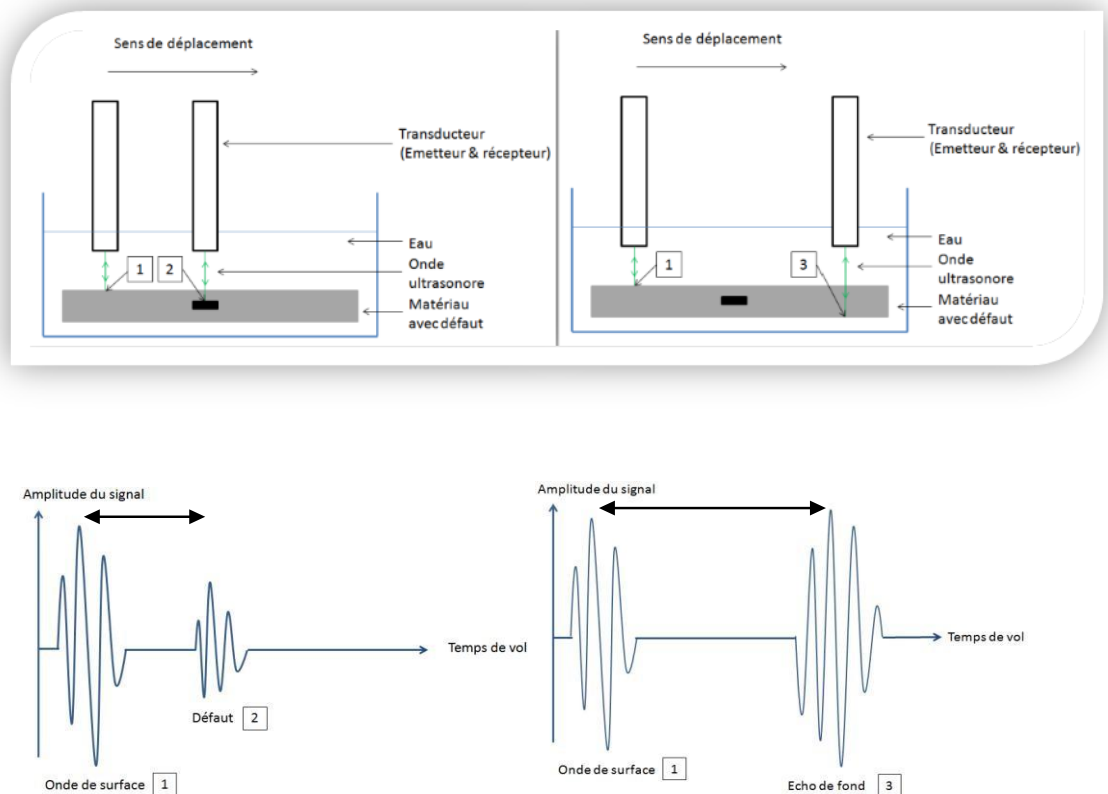


Figure I. 8 Principe des ultrasons par immersion.[08]

Le temps entre l'écho de fond et l'écho de surface étant connu, il devient alors théoriquement possible de connaître la profondeur à laquelle est situé le défaut (en se basant sur le temps de vol entre l'écho du défaut et l'écho de surface).

Cette méthode est souvent utilisée dans l'industrie du fait de sa précision pour détecter des défauts de surface et enfouis. Cependant, il n'est pas possible d'analyser directement la structure entière : l'équipement devient en effet très cher quand les dimensions de la pièce augmentent. Celle-ci doit de plus être immergée, ce qui peut occasionner des problèmes pour certains matériaux. Enfin, les pièces testées doivent avoir une courbure faible et une épaisseur à peu près constante.

Afin de s'affranchir du fluide de couplage, une autre méthode est en cours de mise au point chez certains grands industriels du CND : les ultrasons laser.

Un faisceau laser (soit Nd-YAG (grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme) soit CO₂) pulsé (de quelques dizaines de nanosecondes à quelques femto secondes) impacte la surface du matériau à tester. La puissance optique absorbée par le matériau est convertie en chaleur et aboutit donc à une augmentation rapide de la température locale. Il en résulte une dilatation thermique rapide d'une zone locale ce qui conduit à la génération d'ultrasons dans le milieu. La puissance optique est maintenue suffisamment basse pour qu'une infime partie du matériau ne s'évapore pas et qu'il n'y ait pas de phénomène d'ablation.

La directivité des ondes longitudinales et de cisaillement générées par la source thermoélastique a été calculée théoriquement et vérifiée expérimentalement par un certain nombre de chercheurs. La détection est alors réalisée par un interféromètre (Fabry-Pérot, Michelson). La fréquence des ultrasons observés varie entre 0,1 et 150 MHz. Le principe des

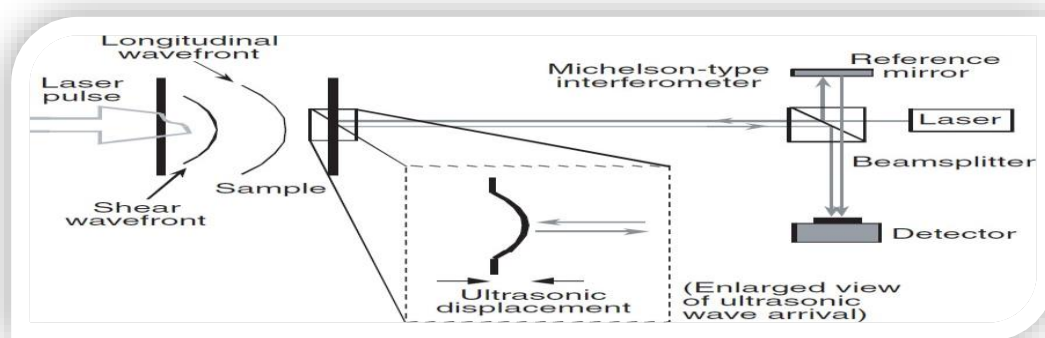


Figure I. 9 Principe de détection des défauts par ultrasons laser, [8].

ultrasons laser est schématisé en Figure 1.9 Cette méthode sans contact est utilisée pour des mesures d'épaisseur, pour l'inspection de soudures, pour détecter des défauts dans les composites (comme montré en Figure 1.10), pour mesurer la profondeur de fissures ou la

taille de grain dans les métaux. Toutefois, cette technique encore relativement onéreuse, est moins sensible que les autres méthodes par ultrasons (du fait que cette méthode utilise un récepteur optique et non plus piézoélectrique). De plus, le rendement de la génération d'ultrasons est fonction des propriétés d'absorption du matériau.

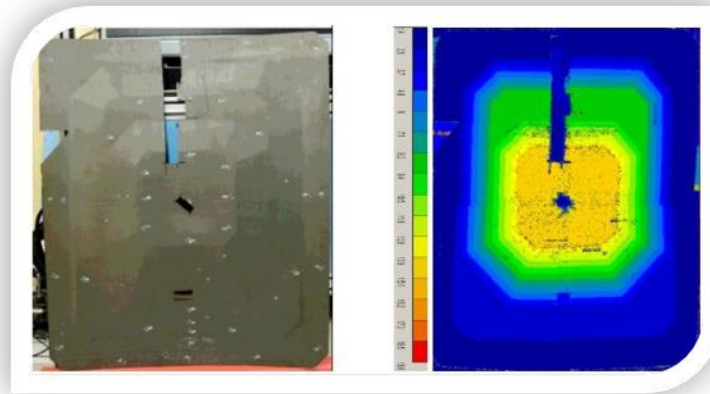


Figure I. 10 Photographie et cartographie par ultrasons laser de l'épaisseur d'un panneau composite.

1.6.8.a. Application

Les ultrasons sont aussi très employés pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les textures, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers, et enfin l'estimation des contraintes mécaniques,

1.6.8.b. Avantages

- Equipements portatifs ;
- Appareil très sensible aux fissures ;
- Résultats immédiats ;
- Absence totale d'inconvénients liés à l'hygiène et à la sécurité,

1.6.8.c. Inconvénients

- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts ;
- Huile de couplage est nécessaire pour le bon fonctionnement de l'opération ; [1][4].
- Assujetti à un couplage pièce traducteur ;



Figure I. 11 contrôle non destructif par L'Ultrason, [2] .

I.6.9. Radiographie

Le principe de la radiographie est relativement simple : des rayons X ou γ (respectivement dans la gamme de fréquence de 3.10^{16} Hz - 3.10^{19} Hz et de 3.10^{19} Hz et plus) sont projetés par une source radioactive sur la structure à analyser. Ces ondes électromagnétiques (de très courte longueur d'onde : entre 10-12 m et 10-8 m pour les rayons X et inférieur à 10-12m pour les rayons γ) traversent en partie la structure, l'autre partie étant absorbée par le matériau. Un film photographique capte ensuite les rayons ressortant. Cette méthode est mise en valeur par la Figure 1.11. Un examen visuel de ce film photographie est enfin réalisé par l'utilisateur

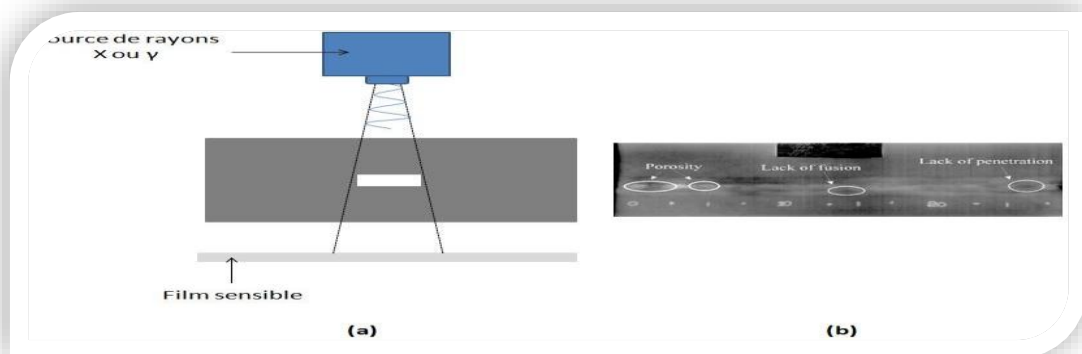


Figure I. 12 Illustration du fonctionnement de la radiographie.

(a) Principe de la radiographie (b) exemple d'image obtenue par radiographie,

La radiographie est une méthode très souvent utilisée pour l'inspection de soudures, pour détecter des défauts débouchant et internes. Cette méthode contrôle l'intégrité de tous types de matériaux (même à travers plusieurs centimètres d'acier) et de pièces à géométrie complexe.

Pour des raisons de sécurité, il est demandé d'utiliser cette méthode avec beaucoup de précaution. En effet la salle doit être entourée de plomb pour confiner les radiations. La taille de l'échantillon est aussi limitée. [7].

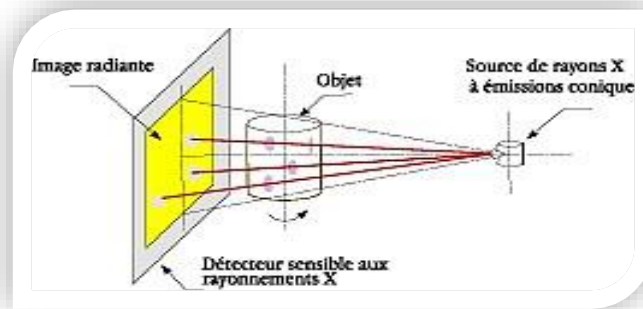


Figure I. 13 Principe de la Radiographie, [11].

1.6.9.a. Application

Traditionnellement, les domaines d'application du contrôle radiographique sont ceux de la fonderie et du soudage métallique avec la mise en évidence de porosités, soufflures, inclusions non métalliques, criques, manque de pénétration. Les nouvelles techniques de contrôle en temps réel sont en train d'élargir ce domaine d'application hors des industries métallurgiques.

1.6.9.b. Avantages

Les avantages majeurs des techniques radiographiques X et γ sont :

- Fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille ;
- Garantir dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures,

1.6.9.c. Inconvénients

- L'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des

conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement qui rendent son utilisation en industrie complètement inadaptée :

- la nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel ;
- le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau ;
- la faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films.[18]

I.6.10. Tomographie

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler. Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste à l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple), la figure ci-dessous donne un aperçu du principe figure (I.14) (15),

Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique, [22]

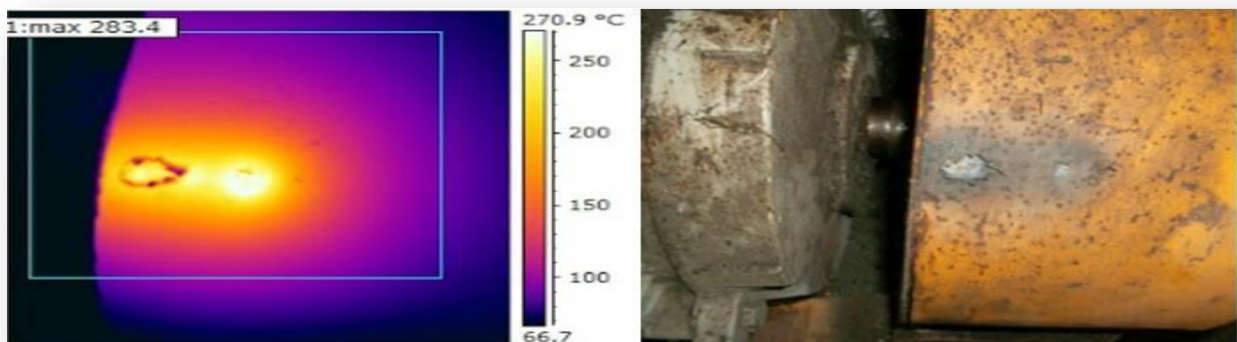


Figure I.14 Principe de la tomographie, [20].

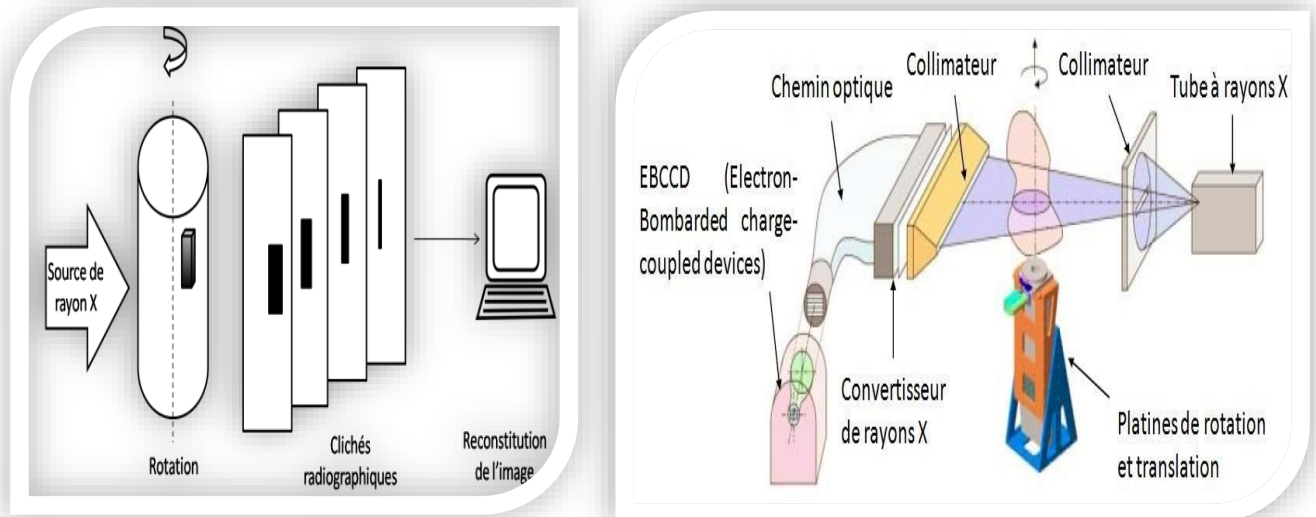


Figure 15. Exemple de la Principe du tomographe. [21]

1.6.8 Contrôle visuel

Le contrôle visuel est la méthode la plus utilisée en CND. En effet des défauts grossiers de surface peuvent être directement relevés par l'opérateur. De plus, cet examen donne des informations sur la méthode de contrôle complémentaire à utiliser. Suivant le type de matériau et l'accessibilité de la zone à contrôler, une méthode sera préférée à une autre pour obtenir les meilleurs résultats possibles.

Il existe deux types de contrôle visuel permettant la détection de défauts surfaciques : direct et indirect. Le contrôle direct est réalisé à l'œil nu, le contrôle indirect à l'aide de petits équipements simples (comme les endoscopes). Les caméras CCD (Charge Couple Device CF chapitre 2) permettent d'obtenir un contrôle plus rigoureux car enregistrable, et pouvant être couplé avec une autre méthode de CND. Toutefois, on ne parlerait plus dans ce cas-là de contrôle visuel comme défini précédemment.

Les limitations de cette méthode sont la reproductibilité et donc les différentes perceptions humaines possibles. De plus, seuls les défauts de surface peuvent être visualisés. [8]

Le contrôle visuel existe depuis... que l'homme a des yeux

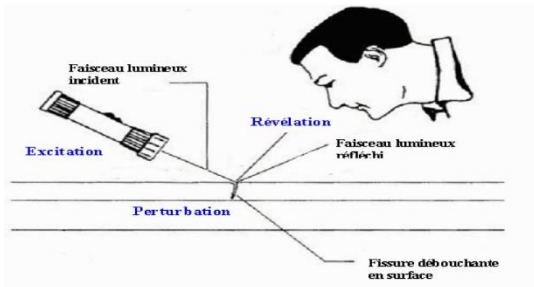


Figure I. 14 Examen visuel et traces de corps.[22]

1.6.10.a. Application

La domaine d'application de cette technique est contrôlée industriel en ligne, qu'il s'agisse du contrôle des produits fabriqués en continu tels que les bandes de tôle, de papier, ou du contrôle de pièces fabriquées en grande série,

1.6.10.b. Avantages

- Examen simple,
- Rapide et moins coûteux,

1.6.10.c. Inconvénients

- Détection limite aux défauts visibles,
- La surface doit être propre, [4][9] [18].

I.6.11. Interférométrie holographique

L'holographie consiste à enregistrer (par interférométrie sur un support photosensible) l'onde lumineuse diffusée ou diffractée (par transmission ou par réflexion) par un objet convenablement éclairé (Figure 1.17), puis à restituer cette onde lumineuse à partir de l'enregistrement (appelé hologramme). Un laser est la plupart du temps utilisé comme source lumineuse car il possède les propriétés adéquates pour la création d'interférences lumineuses de bon contraste.

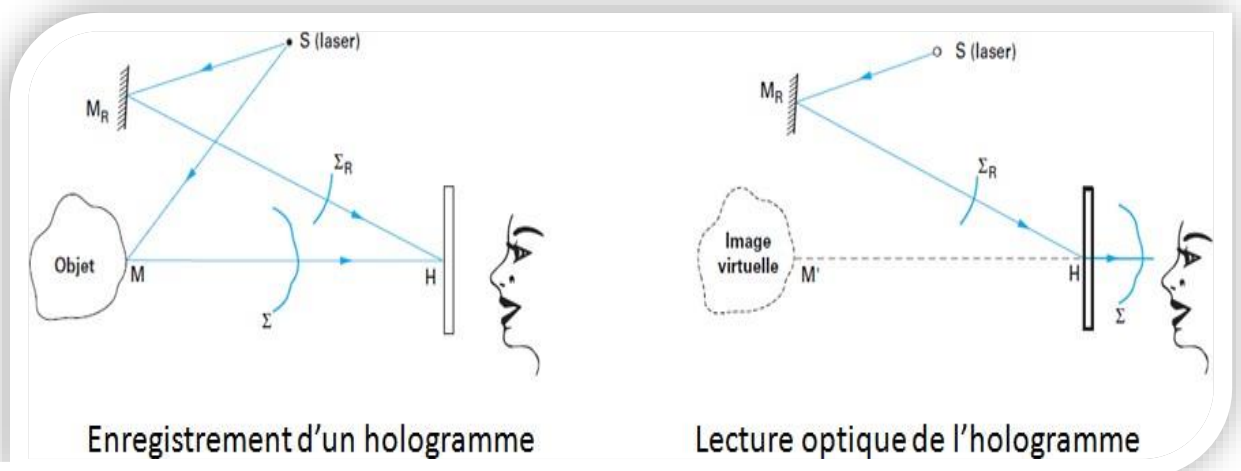


Figure I. 15 Principe de l'holographie, [8].

I.6.12. Interférométrie de Spécule

Pour pallier à l'inconvénient majeur de l'interférométrie holographique (l'utilisation de milieux photosensibles), l'interférométrie de Spécule utilise des milieux d'enregistrement adressables et effaçables électroniquement du type CCD pour calculer et visualiser le champ des déplacements d'un objet diffusant. Le principe de cette méthode est présenté en Figure 1.18.

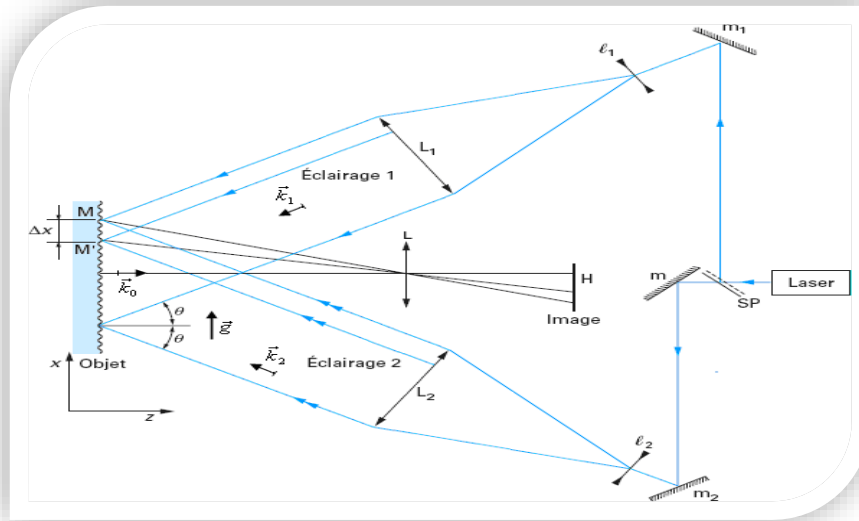


Figure I. 16 Principe de l'interférométrie de Spécule, [8].

Lorsqu'une surface micro-rugueuse est éclairée par un faisceau de lumière cohérente (en pratique, un faisceau laser), celle-ci va refléter la lumière dans toutes les directions selon le principe de Huygens-Fresnel. Les différents faisceaux réfléchis vont interférer entre eux, créant ainsi une figure d'interférence à ondes multiples. Celle-ci n'est alors plus, comme dans le cas de l'interférence d'un nombre fini et faible d'ondes (deux ou trois) un réseau de franges régulier mais au contraire un motif aléatoire d'intensité lumineuse. On parle alors de phénomène de « granularité laser » ou, plus couramment, de « spécule » selon la désignation anglo-saxonne.

Les méthodes les plus employées dans l'industrie sont la TV-holographie et la sériographie qui sont utilisées respectivement pour l'analyse vibratoire et le contrôle non destructif des pièces. La sériographie est utilisée notamment pour contrôler les pièces de grande taille en matériaux composites. Sa résolution spatiale élevée (résolution spatiale inférieure au micron) et la possibilité de révéler les défauts d'un matériau quasiment en temps réel en font une méthode complémentaire au contrôle ultrasonore. La mise en évidence de la

Présence de défauts est représentée par la Figure 1.19

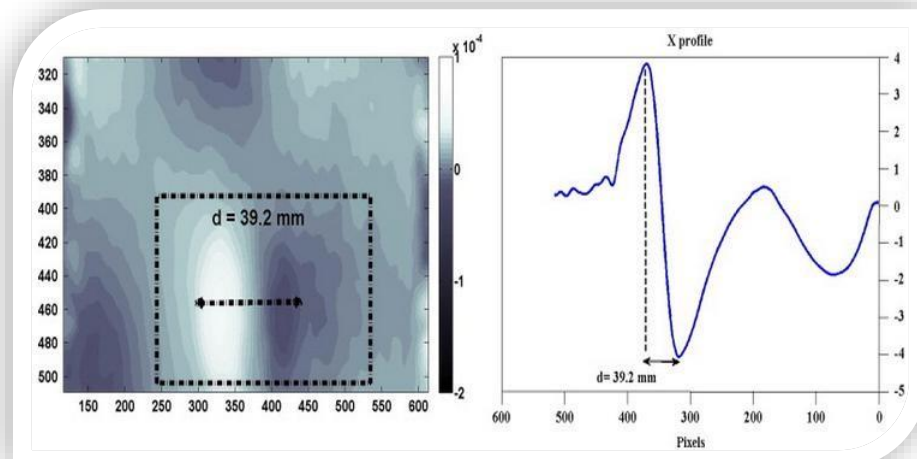


Figure I. 17 Détection et mesure de défauts par sériographie [8]

I.6.13. Thermographie

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages) et pour le contrôle de matériaux céramiques, qui sont des conducteurs de chaleur relativement médiocres, [22] [19] [30]

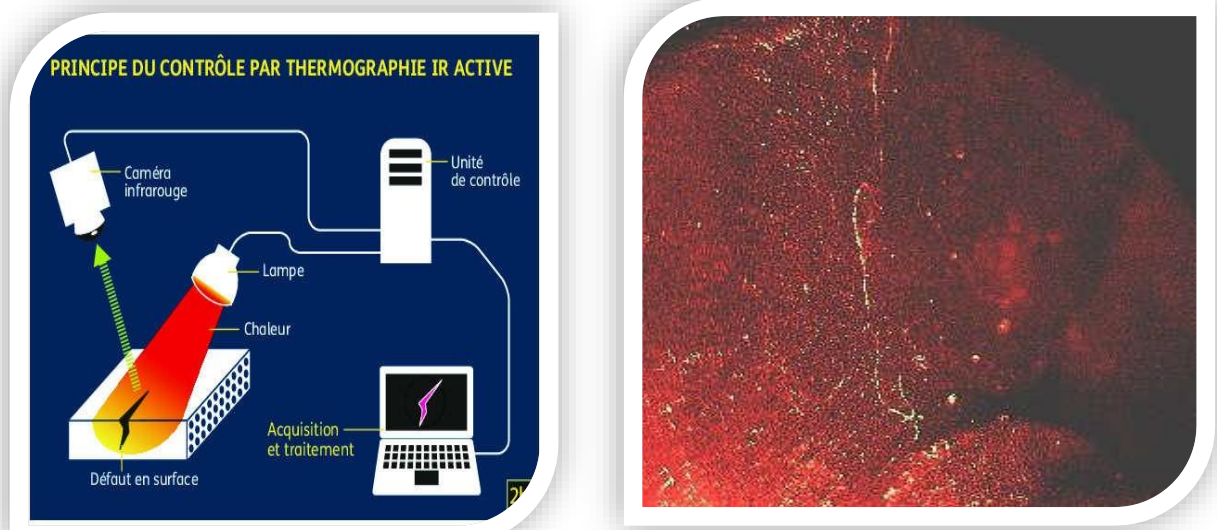


Figure I. 18 Principe du CND par thermographie,[22].

1.6.13.a. Avantages

- Méthode relativement rapide et sans contact ;
- Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- Les cavités (champs de bulles d'air, fissures, délaminages) sont bien détectées ;
- La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;
- L'archivage des résultats est garanti à l'aide de la caméra infrarouge.

1.6.13.b. Inconvénients

- Des difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs ;
- Des difficultés de localisation de profondeur des défauts, du fait que l'image obtenue donne une projection de ces derniers sur le plan de la pièce testée ;
- L'interprétation des mesures pas toujours facile, surtout identifier la nature des défauts ;
- La phase d'interprétation des résultats présente des restrictions pour une automatisation totale de la technique, [9].

I.7. Méthodes CND couplées

Des méthodes couplées telles que les techniques électromagnétiques-acoustiques et magnéto- optiques sont aujourd'hui développés.

I.7.1. CND électromagnétique acoustique

Pour cette méthode, on parle de manière générale de palpeurs EMAT (Electromagnétique Acoustique Transducteur). Ces capteurs sont sans contact mais doivent être placés très près de la surface à inspecter. Si l'on fait circuler un courant variable dans une bobine placée près de la surface de la pièce conductrice et ferromagnétique, il y a, par induction, circulation de courants de Foucault (Figure 1.21)

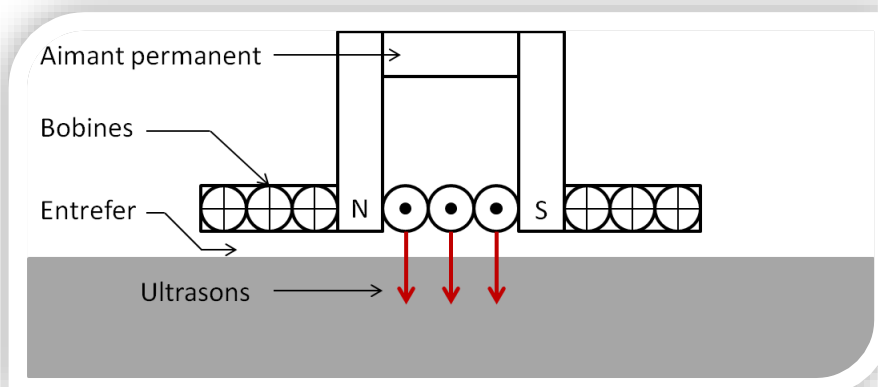


Figure I. 19 Principe des palpeurs EMAT [08]

Si de plus on applique simultanément un champ magnétique connu, convenablement orienté par rapport aux courants de Foucault, il y a interaction électromagnétique et création de forces de Lorentz. Le caractère alternatif du courant d'excitation a pour conséquence un changement de signe des forces de Lorentz. Si le choix des fréquences et de la géométrie de la bobine d'excitation est correctement réalisé, il est possible de générer des ondes acoustiques [44]. Celles-ci induisent un signal électrique dans le palpeur qui peut donc ensuite être utilisé en tant que récepteur

Cette méthode sans contact peut être utilisée à haute température et peut créer différents types d'ondes comme des ondes de cisaillement, longitudinales, de Rayleigh, de Lamb, de plaque. Toutefois, les palpeurs EMAT ne fonctionnent qu'avec des matériaux conducteurs et ferromagnétiques, la force d'attraction entre le transducteur et la pièce étant de plus assez importante. Enfin, le signal de retour est très faible ce qui empêche une caractérisation correcte des défauts détectés.

I.7.2. CND Magnéto-optique

Cette technique est applicable à des pièces conductrices planes ou localement planes. En effet, elle doit permettre le contrôle rapide de surfaces étendues (telles que les ailes ou les fuselages d'avion) grâce à la production en temps réel d'images relatives à la présence de défauts. Le principe de base de cette technique repose sur la combinaison d'un excitateur induisant la circulation de courants de Foucault dans la pièce à contrôler, avec un dispositif d'imagerie du champ magnétique résultant à la surface de la pièce, qui exploite l'effet Faraday apparaissant dans une grenat magnéto-optique (Figure 1.22).

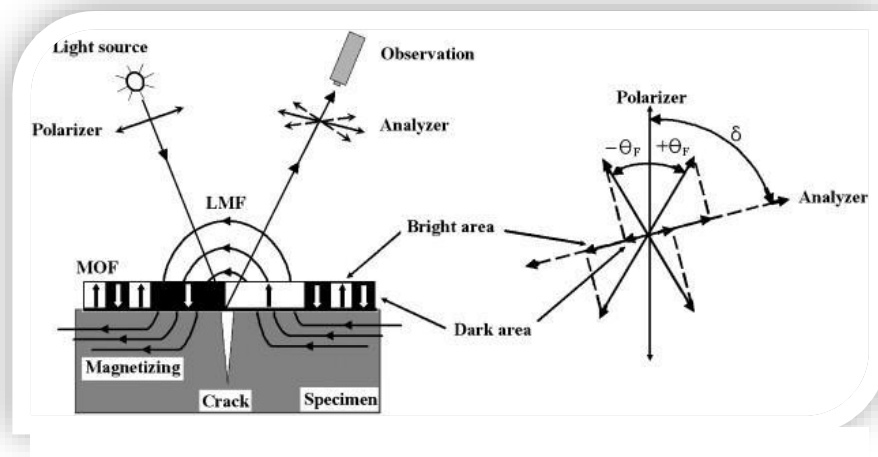


Figure I. 22 Principe de CND par magnéto-optique, [8].

Grâce à cette méthode, l'utilisateur n'a par exemple plus à enlever la peinture recouvrant la pièce avant de la contrôler. De plus, la distribution du flux de fuite autour du défaut est retranscrite sur le capteur avec une résolution spatiale élevée. Toutefois, l'inspection de fissures situées sur une surface courbe n'est pas évidente.

Les méthodes couplées sont donc principalement appliquées pour l'instant à des matériaux conducteurs et ferromagnétiques.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif, les différents types de défauts détectés en CND, le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir :

- Ressuage
- Contrôle d'étanchéité
- Magnétoscopie
- Courants de Foucault
- Analyse vibratoire
- Emission acoustique
- Ultrasons
- Radiographie
- Tomographie
- Contrôle visuel
- Interférométrie holographique
- Interférométrie de Spécule et enfin le Thermographie .

Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.

Comme la plupart des matériaux utilisés en électrotechnique soit de type conducteur électrique ou magnétique, le CND par courants de Foucault s'adapte bien pour ces types de matériaux, nous avons jugé utile de lui consacrer le chapitre suivant.

Chapitre II :

Modélisations du CND par Courants de Foucault

Chapitre II . Modélisation du CND par Courants de Foucault

II.1. Introduction

Dans le domaine des CND par CF, en raison des performances du matériel informatique, la modélisation numérique est devenue le principal outil de recherche sur la conception des sondes et les performances d'inspection des systèmes.

En général Les capteurs à courants de Foucault (CCF) sont utilisés pour contrôler les pièces conductrices, en particulier les pièces métalliques, depuis plus d'un siècle. Aujourd'hui, la théorie des capteurs à courants de Foucault a été largement développée. Ils ont des applications dans une variété de domaines industriels, de la mesure des propriétés des matériaux, la mesure dimensionnelle à la détection de défauts dans les pièces mécaniques,

Dans ce chapitre, nous introduisons plus en détail le contrôle non destructif par courants de Foucault et ses principes, avantages et inconvénients, puis nous passerons en revue différents modes d'inspection, différents types de capteurs à courants de Foucault, des circuits magnétiques avec différentes géométries, et enfin nous terminerons par l'application des courants de Foucault.18]

II.2. Historique

Dans le domaine du contrôle non destructif (CND), la technique des courants de Foucault est l'une des plus anciennes. Elle repose sur les phénomènes d'induction auxquels il faut associer les noms de : André-Marie Ampère (1775-1836), Michaël Faraday (1791-1867), Léon Foucault (1819-1868), Heinrich Lenz (1804-1865) et James Maxwell (1831-1879).

Les premiers appareils de mesure d'épaisseur datent de 1926. Dès 1930, on commence à utiliser les courants de Foucault au niveau industriel pour inspecter des tubes soudés. A partir de l'année 1950, l'industrie du nucléaire développe les techniques de contrôle par Courants de Foucault et en établit les bases.

De la balance pour peser la monnaie en électrum du VIII^{ème} siècle avant J.C à l'interférométrie holographique de nos jours, ces méthodes de contrôle sont maintenant banalisées et nous les retrouvons dans de nombreuses applications quotidiennes. Ainsi, dans une salle d'attente d'aéroport un portique détecte tous les objets métalliques (les trousseaux de clefs,

les porte-monnaie), en été, sur les plages, des « démineurs » utilisent des « poêles à frire » pour rechercher des pièces perdues etc. [24].

II.3. Principe physique CND par CF

L'alimentation de la bobine du capteur par un courant variable crée un champ d'excitation variable sous la loi de Maxwell Ampère. Toute pièce conductrice baignant dans ce champ sera le siège des courants induits appelés courants de Foucault. En vertu de la loi de Lenz, ces courants reproduisent à leur tour un champ magnétique opposant au champ qui leur a donné naissance. Le champ résultant modifiera alors le courant dans la source et par conséquent l'impédance du capteur. La figure (II.1) résume le principe de CND par courants de Foucault, (II.1), [12].

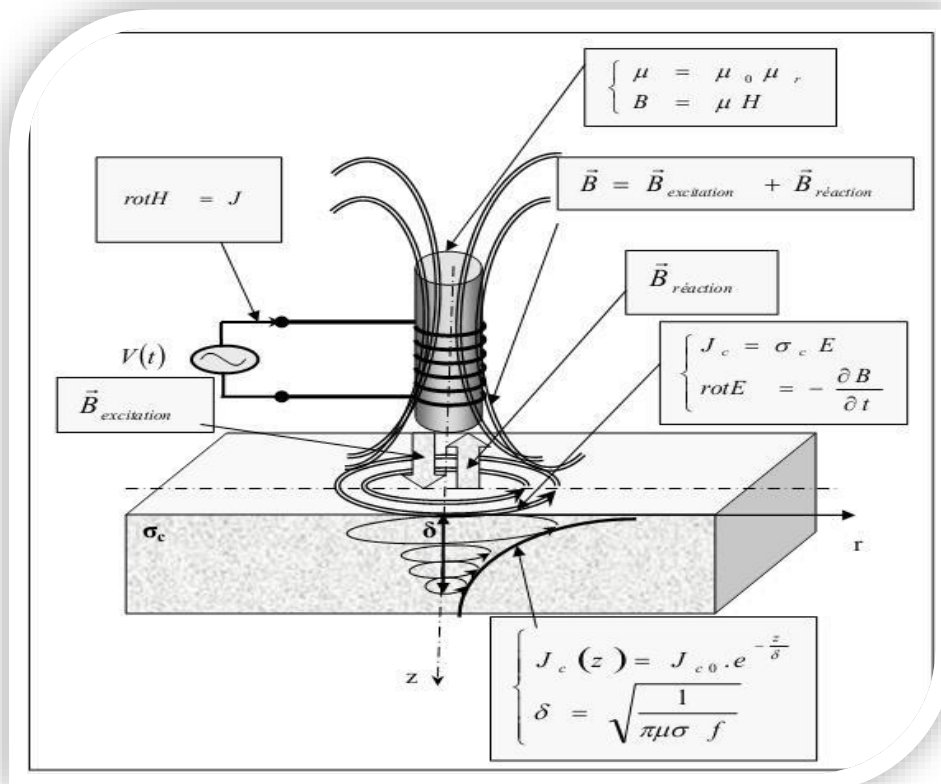


Figure II. 1 Les lois régissant le contrôle non destructif par courants de Foucault. [6].

II.4. Objectifs du CND-CF

Un capteur à courants de Foucault peut accomplir diverses tâches. Du fait que l'impédance du système Capteur/Pièce est fonction des différentes caractéristiques électromagnétiques et géométriques. Par fois utilisé pour la caractérisation géométrique et électromagnétique, d'autre fois pour le contrôle de l'état de santé en cherchant et caractérisant les défauts. La figure (I.5) illustre les différentes fonctions d'un capteur CF [6] [12]

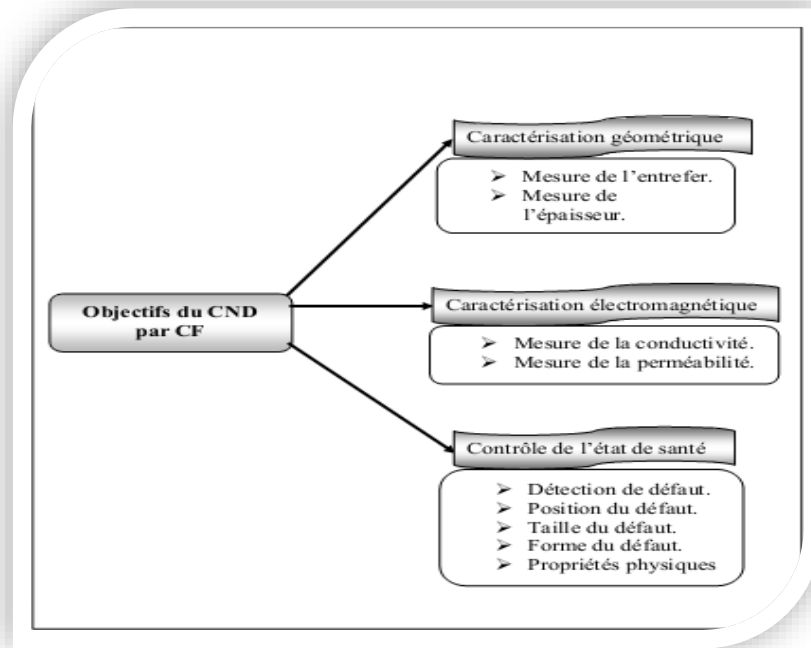


Figure II. 2 Les objectifs de contrôle par courants de Foucault [20].

II.5. Technique de contrôle par courant de Foucault CND-CF

Les courants de Foucault sont gérés par les lois du phénomène électromagnétique d'induction schématisé sur la figure I.2. Ce phénomène d'induction a pour racine la variation temporelle du flux magnétique. Cette variation est due soit à celle de la section traversée par le champ magnétique ou à la variation temporelle de ce champ lui-même ou les deux simultanément. Dans le contrôle non destructif par courant de Foucault, c'est la variation temporelle du champ d'excitation qui cause l'induction. Sur la base de génération des champs d'excitations variables dans le temps, on peut distinguer plusieurs techniques de contrôle

- ✓ Les courants de Foucault sinusoïdaux,
- ✓ Alternative Current Field Measurement « ACFM » et ses dérivées,
- ✓ Les courants de Foucault pulsés,
- ✓ Les champs lointains.

Nous nous intéressons dans notre travail à la technique de contrôle par courants de Foucault sinusoïdaux. Cette technique est un cas particulier des techniques des courants de Foucault pulsés et très proche de la technique de l'ACFM. Le contrôle par des champs lointains n'est qu'un cas particulier du contrôle par courants de Foucault.

II.6. Nature de control par courant de Foucault CND-CF

La répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent de la conductivité électrique σ , de la perméabilité magnétique μ , de la fréquence de travail f , de la géométrie du matériau à contrôler, du couplage entre le capteur et le matériau et d'éventuels défauts dont la présence se manifeste à travers une combinaison complexe des paramètres précédents. Le procédé de contrôle par courants de Foucault permet donc d'effectuer des contrôles dimensionnels, des contrôles de l'état de santé et de réaliser des caractérisations métallographiques.

Le contrôle dimensionnel s'applique à des mesures d'épaisseur de revêtement (ex : peinture, dépôt électrolytique) et la détermination des caractéristiques géométriques du matériau (ex : l'épaisseur de petits tubes ou de plaque). Le contrôle de santé recherche la présence de défauts (fissures, inclusions). Le contrôle métallographique est destiné à discriminer les matériaux, de dureté, de composition chimique ou de structure métallographique différente. [24]

II.7. Modélisation du dispositif de CND-CF

Le dispositif de contrôle non destructif par courants de Foucault peut être modélisé par le système représenté sur la figure (II.1) Un matériau, constituant la pièce critique et contenant la fissure, est soumis à l'action d'un champ électromagnétique produit par une bobine représentant un capteur CF où une densité de courant variable dans le temps est imposée (Figure II.3) [21]

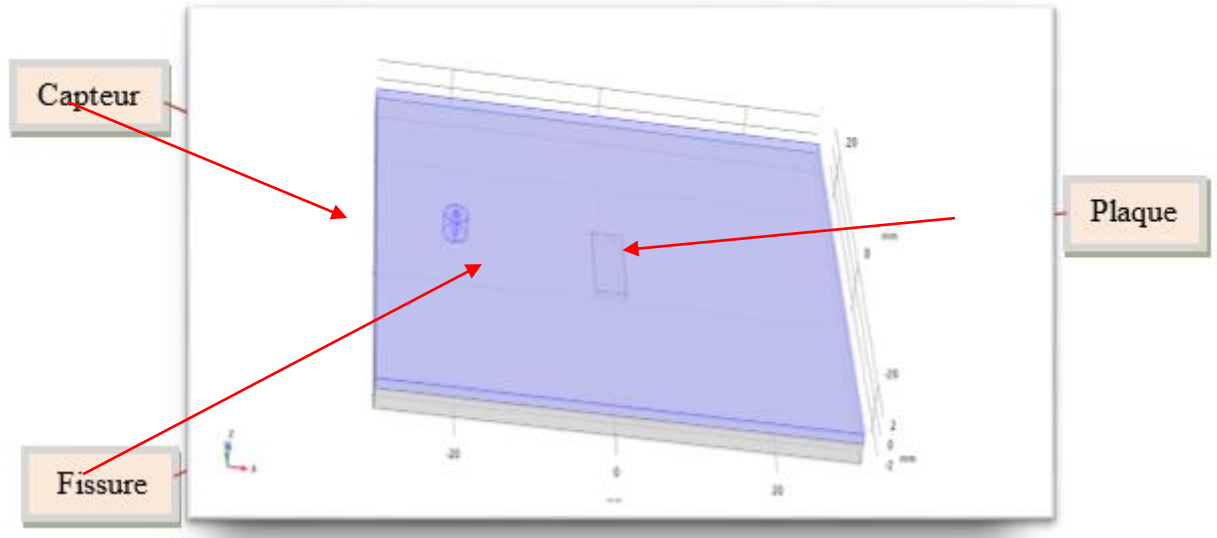


Figure II. 3 Système capteur-fissure.

L'objectif est d'évaluer les courants de Foucault dans la pièce défectueuse ainsi que la variation d'impédance de la bobine. Les dispositifs de CND que nous envisageons de modéliser se placent dans le cadre de la magnétodynamique basse fréquence en régime quasi-stationnaire.

Il s'agit des dispositifs constitués d'inducteurs filaires, de régions conductrices, non conductrices magnétiques ou amagnétiques et de sources de courant.

La modélisation de ces dispositifs peut être ramenée, dans le cas général, à un problème magnétodynamique type comme indiqué sur la figure (II.4). L'ensemble de ce système forme le domaine de calcul Ω de frontière Γ

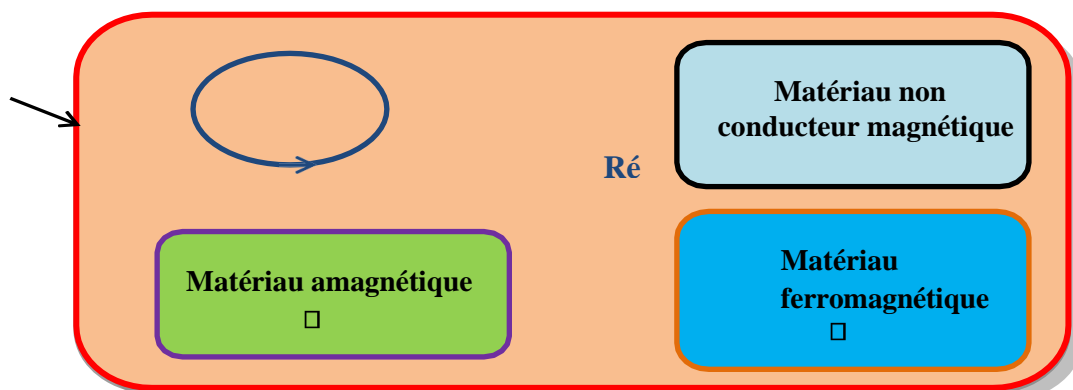


Figure II. 4 Cas général d'un Problème magnétodynamique [21] [24]

II.7.1. Capteur

Plusieurs critères sont pris en compte durant la classification des capteurs. La configuration des capteurs diffère selon leurs géométries, leurs fonctions et leurs modes de contrôle. La Figure (II.5) résume les trois critères déjà cités. [6]

- ✓ Type
- ✓ Fonction
- ✓ Mode de contrôle

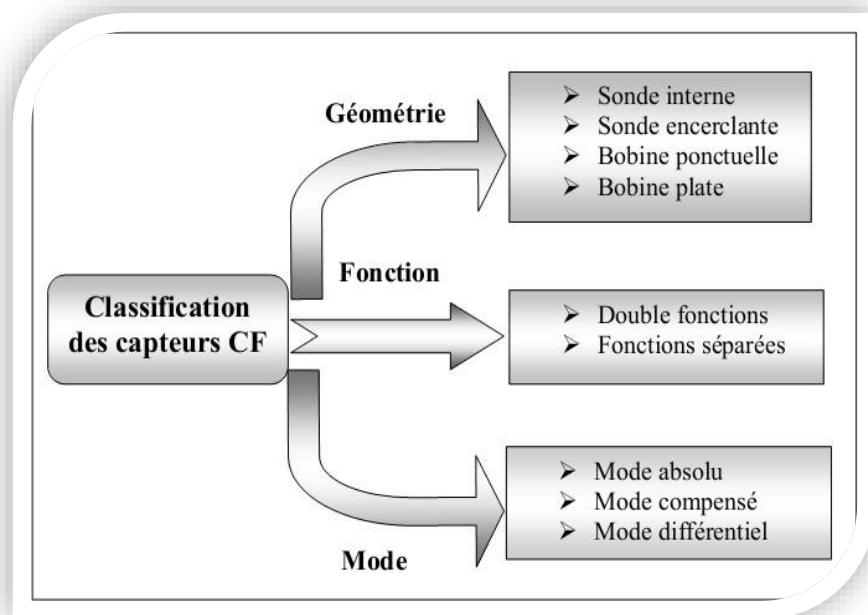


Figure II. 5 Classification des capteurs CF [20] [12]

II.7.2. Types de capteur

Du point de vue géométrique, on distingue quatre types de capteurs :

- ✓ Sonde interne
- ✓ Sonde axial encerclant
- ✓ Sonde ponctuelle
- ✓ Bobine plate

II.7.2.a. Sonde interne

C'est un capteur qui est destiné à l'examen d'un produit creux par l'intérieur, dont les enroulements de mesure entourent l'axe de translation. Ils opèrent soit avec ou sans noyau, Figure (II.6). [23] [26] [19] [31]

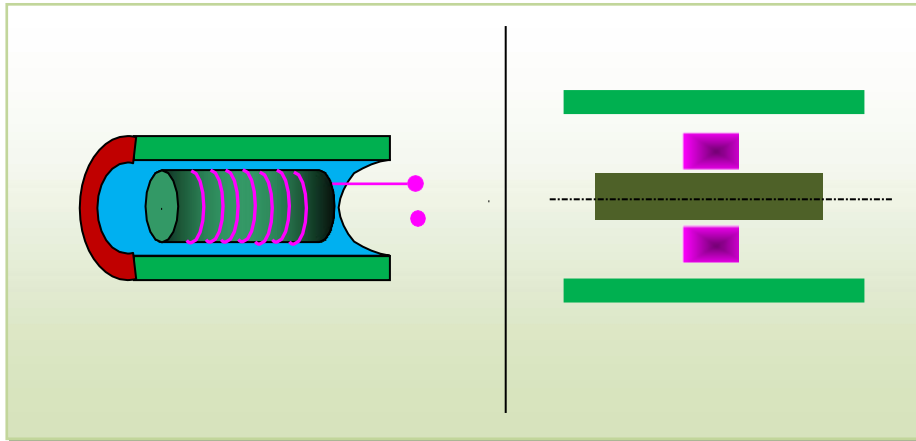


Figure II. 6 Bobine interne avec noyau [23] [26] [19]

II.7.2.b. Capteur axial encerclant où bobine encerclant

Ce sont des capteurs dont les enroulements de mesure entourent la pièce à contrôler. Ils sont destinés au contrôle des produits longs ou des pièces au défilé (Tubes, barres,). Ils sont les plus répandus dans le domaine industriel, Figure (II.7), [24]

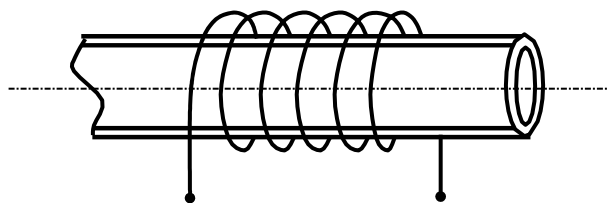


Figure II. 7 Bobine encerclant [24]

II.7.2.c. Sonde ponctuelle

Elle est utilisée pour l'inspection des objets à des endroits précis. L'axe du capteur est perpendiculaire à la surface de la pièce. En effet, ce palpeur permet de faire un contrôle local des pièces même celles dont la géométrie est complexe, Figure (II.8). [26] [23].

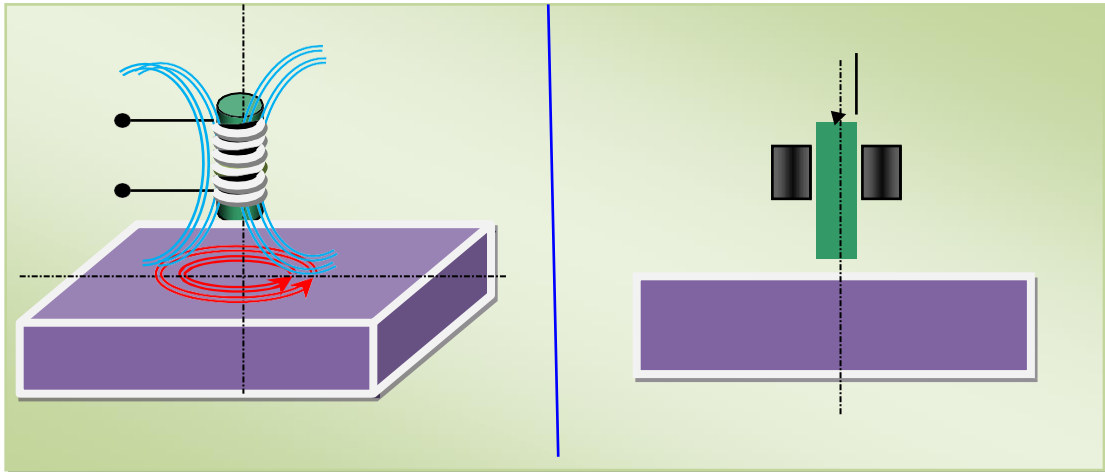


Figure II. 8 Sonde ponctuelle [26] [23] [19]

II.7.2.d. Bobine plate

De la même manière que la bobine ponctuelle, ce capteur opère sur les surfaces des pièces. Vue sa géométrie, sa zone d'action est plus large, Figure (II.9), [23] [26] [19] .

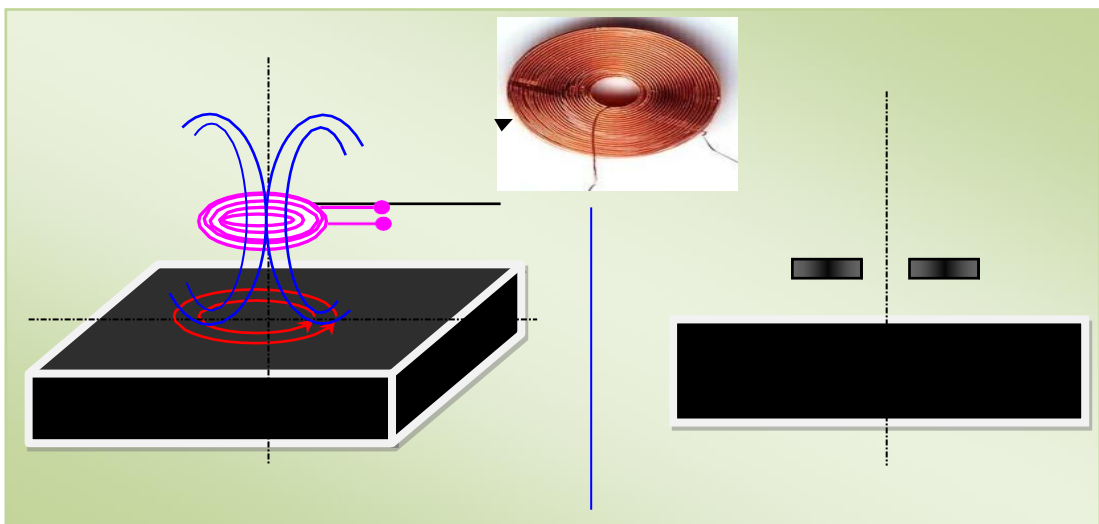


Figure II. 9 Bobine plate, [23] [19]

II.7.1. Fonctionnes de capteur

Le fait qu'un bobinage peut être inducteur ou induit donne la possibilité au capteur de jouer le rôle de l'émetteur ou de récepteur ou les deux fonctions simultanées

II.7.1.a. Les capteurs à double fonction

Ce capteur assure les deux fonctions (figure II.11) d'excitation et de réception. L'extraction de l'information se fait par la mesure de l'impédance équivalente ou de la variation de l'impédance. Cette dernière est due à la présence du matériau au voisinage du capteur ou à la présence d'une anomalie dans ses matériaux, Figure (II.10), [6]

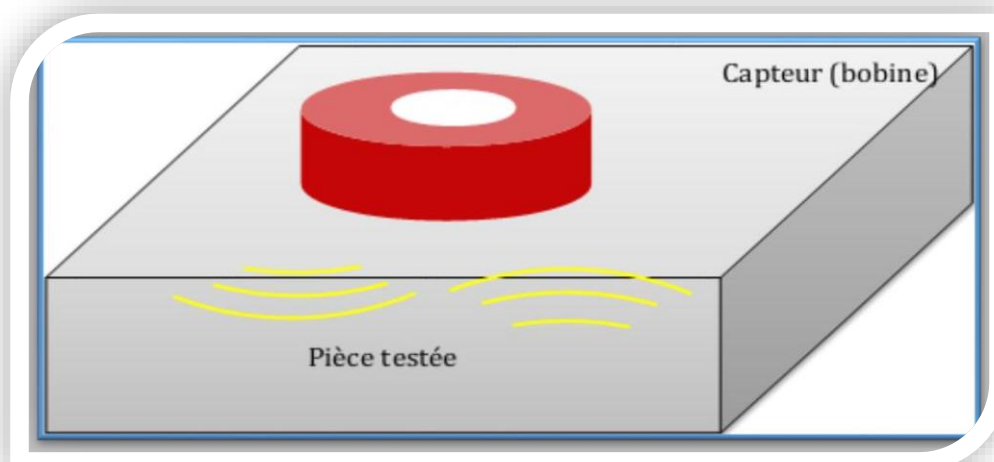


Figure II. 10 Capteur à double fonction, [19].

II.7.1.b. Les capteurs à fonction séparées

Le capteur est muni d'un second enroulement qui servira uniquement pour la mesure (Figure II.11). On parle alors de mesure par Trans impédance ou de capteur à fonctions séparées, [23].

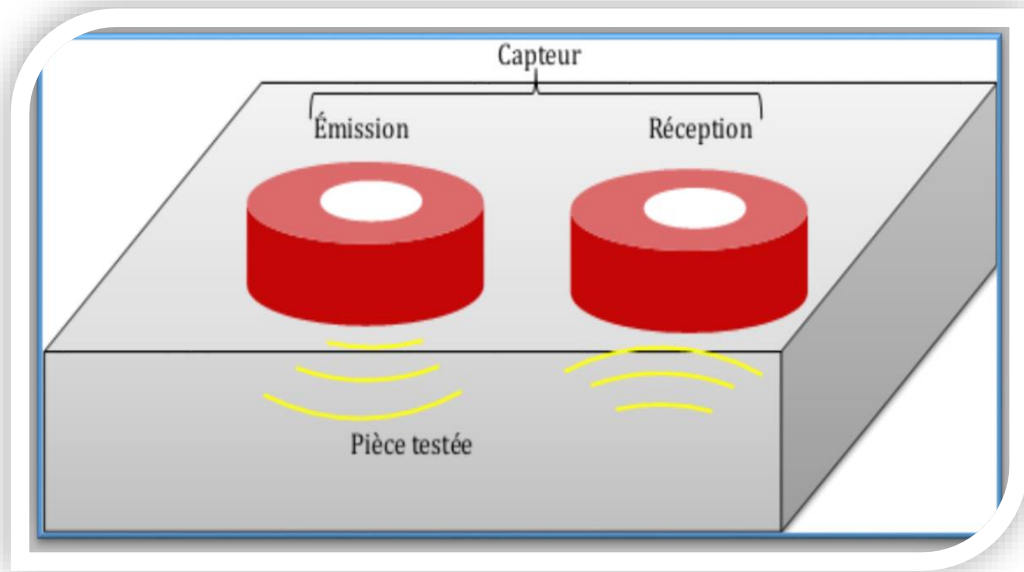


Figure II. 11 Capteur à fonction séparée , [19].



Figure II. 12 Quelques exemples de photos de capteurs, [14] [12].

II.7.2. Bobine

La bobine est un élément qui peut réaliser l'émission et/ou la réception. Il existe deux principales classes de bobine,

II.7.2.a. Bobines classiques

La bobine est fabriquée par l'enroule en hélicoïdal d'un conducteur (cuivre) émaillé autour d'un noyau. Le noyau est généralement diélectrique (isolant) ou magnétique (ferrite...). L'utilisation d'un noyau magnétique permet délocaliser le champ magnétique autour de la bobine,

II.7.2.b. Bobines gravées

Il existe deux types de bobines gravées :

- Bobines réalisées sur circuit imprimé en utilisant les technologies PCB standards,
- Micro bobines (taille de l'ordre du mm) réalisées en salle blanche par des moyens de Micro technologies. La fabrication fait appel à différentes étapes de dépôts et de gravure telles Que montrées dans la figure (II.13), [12]

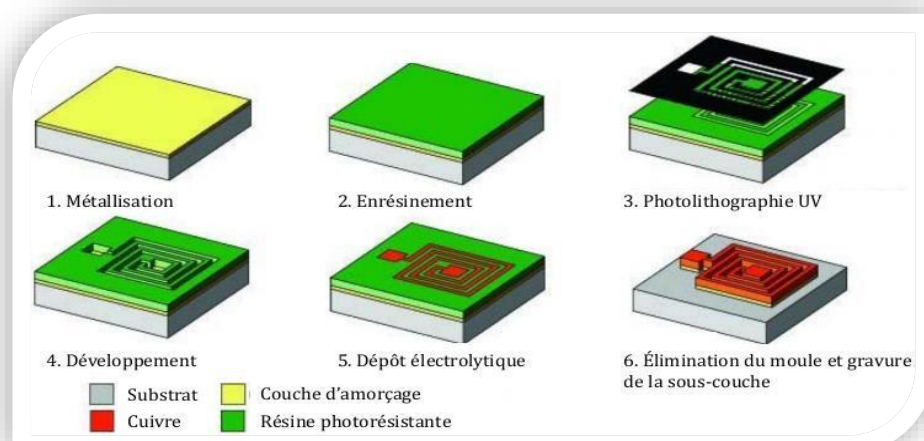


Figure II. 13 Etapes de réalisation des bobines micro moulées, [12].[19]

II.7.2.c. Bobine souples

L'utilisation de capteurs traditionnels dans une application de CND par CF est mal adaptée pour l'examen d'objets dont la surface est de forme complexe (comme la variation du rayon de courbure). Le capteur n'épousera pas la forme de la pièce et son couplage magnétique avec celle-ci sera mauvais. Des études spécifiques sont Alor nécessaires, ce qui allouer dites

coûts de Développement Pour pallier à ces obstacles et apporter aux utilisateurs des solutions efficaces, un recours à un capteur flexible apparaît comme une solution adéquate. En déplaçant le capteur sur la surface irrégulière, sa flexibilité lui permet d'épouser la surface de la pièce testée en minimisant la variation du lift-off durant le scan des surfaces complexes, Figure (II.14) , [12] [13] [22] [19].

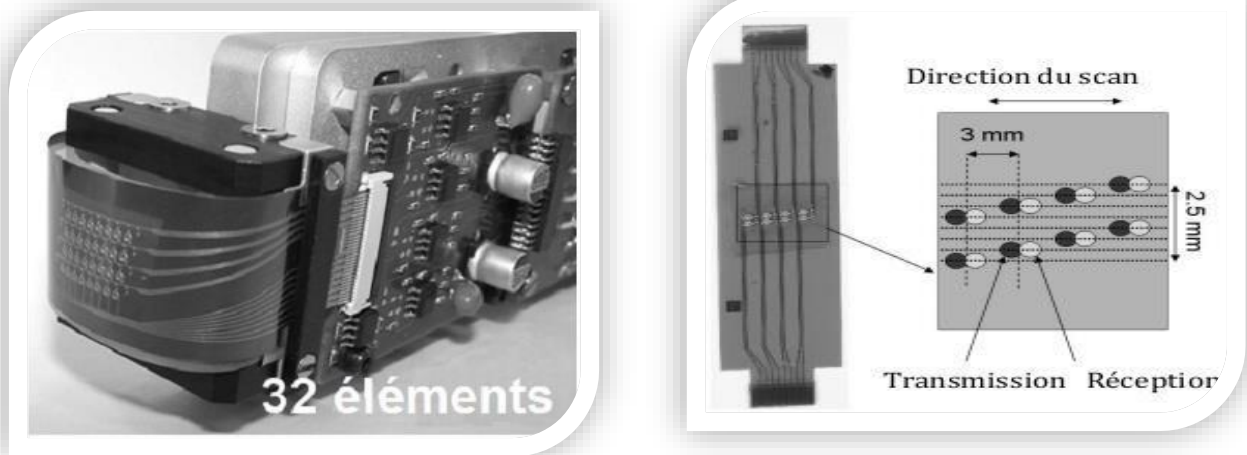


Figure II. 14 Capteur constitué de quatre couples de bobines sur un film de Katona souple.

La conception de capteurs souples fait l'objet de développements récents. On voit ainsi apparaître des capteurs mettant en œuvre des petites bobines montées sur un support souple ou encore de grandes bobines souples. La figure II.15 montre un exemple de capteur développé au CEA constitué de plusieurs bobines gravées sur support flexible, [5]. [12] [19]

II.7.3. Mode de contrôle

En fonction de l'intensité du champ, qui dépend des caractéristiques électromagnétiques de la pièce à identifier ou à contrôler et des perturbations éventuelles, on compte trois modes de mesure :

- ✓ Mode de contrôle absolu
- ✓ Mode de contrôle compensé
- ✓ Mode de contrôle différentiel

II.7.3.a. Mode de contrôle absolu

La méthode absolue utilise un capteur à double fonction. La mesure se fait par la comparaison du signal reçu à une référence artificielle. Ce mode permet d'accéder aux grandeurs utiles ainsi qu'aux grandeurs perturbatrices (température,).

Le schéma de la figure (II.15) montre la mesure en mode absolu par un pont d'impédance.

- La bobine d'examen est une branche d'un pont d'impédance alimenté par oscillateur. En absence de défaut, le pont est équilibré.
- Un signal apparait dans le plan complexe dès que la sonde s'approche du défaut.
- L'amplitude du signal est liée au volume de la matière affectée par le défaut. De même, la phase est fonction du type du défaut et des profondeurs. [6].

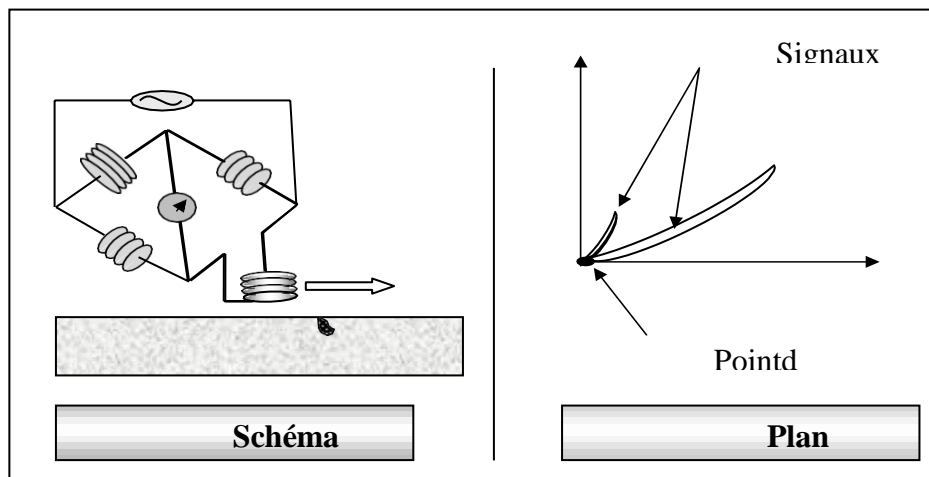


Figure II. 15 Sonde absolue, [6].

II.7.3.b. Mode de contrôle compensé

Pour s'affranchir des grandeurs perturbatrices, on réalise le mode absolu compensé. Dans ce mode de contrôle on utilise deux bobines

L'une est positionnée à proximité d'une surface d'une pièce à contrôler et l'autre positionnée à proximité d'une surface d'une pièce à contrôler et l'autre à proximité d'une autre surface saine du même matériau, comme le montre la figure II.16 La première capte les grandeurs utiles et perturbatrices alors que l'autre ne capte que les signaux perturbateurs. Une mesure comparative permet d'extraire seulement les signaux utiles.

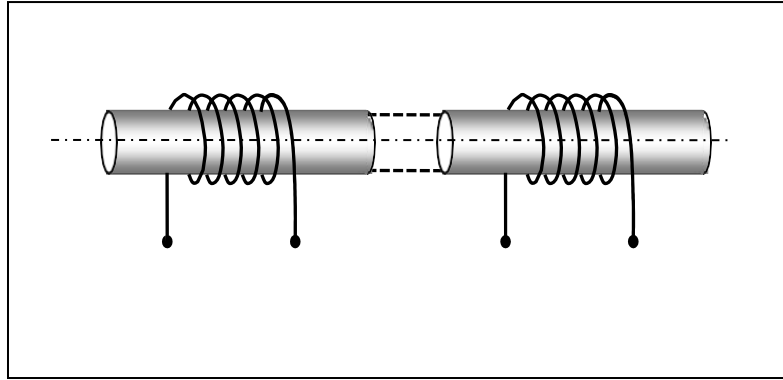


Figure II. 16 Mesure absolue compensée [24]

II.7.3.c. Mode de contrôle différentiel

La mesure différentielle est une comparaison de deux mesures effectuées simultanément d'impédances de deux capteurs absolus dont les flux sont opposés (Figure II.17), [3].

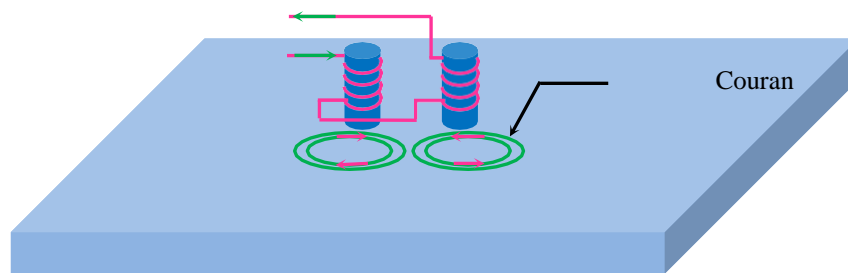


Figure II. 17 Sonde différentielle, [26].

En effet, dans le cas d'une pièce saine, l'impédance différentielle est nulle. Par contre, si la pièce présente une anomalie l'amplitude de la grandeur d'alimentation est modifiée (Figure II.18.a).

- Le passage de la sonde devant un défaut provoque l'apparition d'un signal (courbe de Lissajous) dans le plan complexe (Figure II.18.b).
- L'amplitude du signal est fonction du volume de la matière affectée. De même, la phase est liée au type de défaut et à sa profondeur.

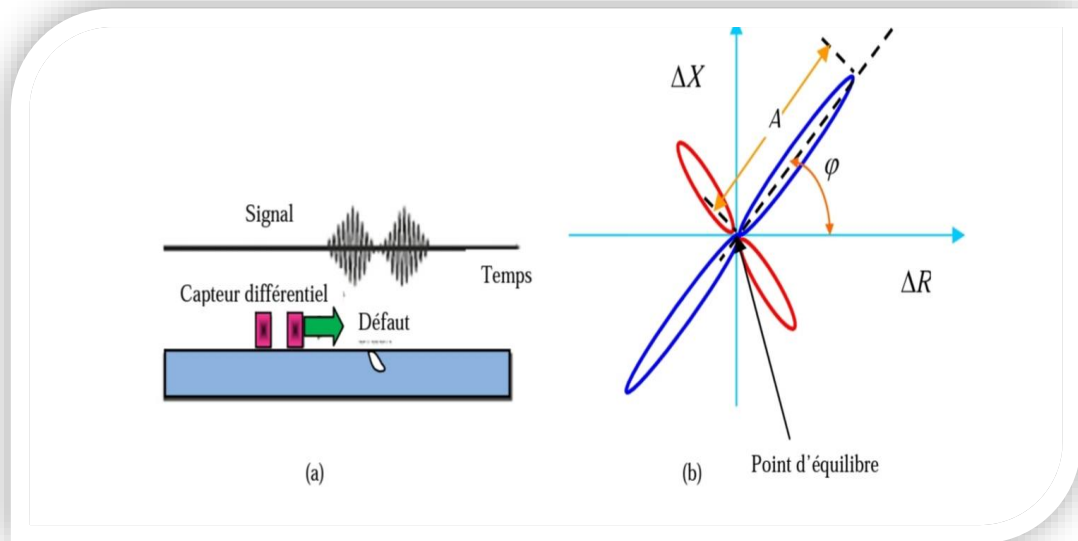


Figure II. 18 (a). Perturbation du signal d'alimentation, (b) Courbe Lissajous, [26].

II.7.4. Méthode de résolution

On peut envisager de résoudre les équations de Maxwell :

- De manière analytique : ceci n'est limité qu'à quelques cas particuliers : géométries simples (structures 2D ou 3D axisymétriques), excitations pour lesquelles on peut exécuter une transformée de Laplace inverse,
- de manière numérique : on distingue les différences finies, les éléments finis et l'équation intégrale de frontière. La méthode des éléments finis (MEF) sera utilisée lorsque l'excitation s'effectue basse ou moyenne fréquence (la profondeur de pénétration standard n'est pas négligeable devant les autres dimensions). La méthode des équations intégrales de frontière ne peut s'appliquer que si les courants de Foucault se développent sur une profondeur qui peut être considérée comme négligeable, [9].

II.7.4.a. Méthodes analytiques

Historiquement, l'étude des circuits magnétiques et des machines électriques a été réalisée de manière analytique et même géométrique, car l'outil de calcul disponible était faible. Par contre, ces méthodes permettent de rendre compte du fonctionnement de ces machines, ainsi que des principaux phénomènes mis en jeu, [14].

La résolution analytique des équations de Maxwell permet d'obtenir une solution mathématique exacte du problème, néanmoins elle reste limitée à des configurations simples. À titre d'exemple, on peut citer les travaux de Dodd et Deed qui ont procédé à des solutions directes des équations différentielles par la méthode de séparation des variables. Parmi ces travaux on retrouve :

- Une bobine à air axisymétrique de section rectangulaire située au-dessus de deux couches métalliques parallèles de matériaux différents.
- Une bobine de section rectangulaire encerclant deux cylindres métalliques concentriques (Figure II.19).

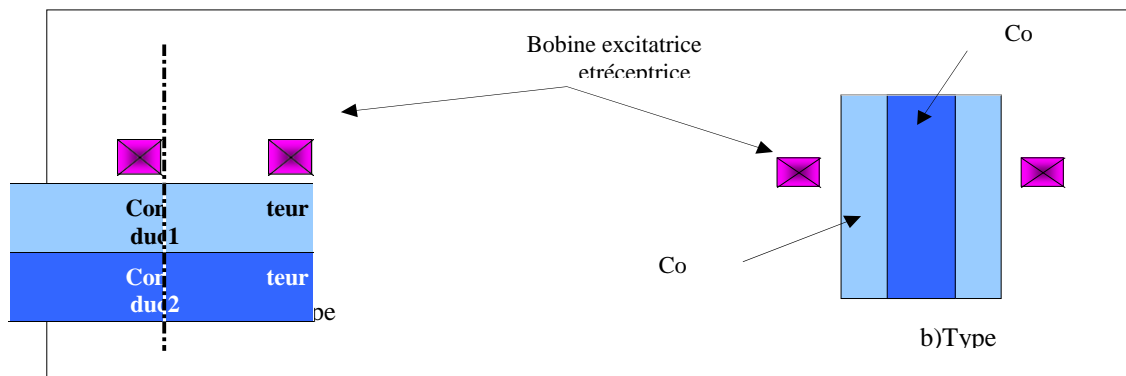


Figure II. 19 Géométries axisymétriques traitées par Dodd et Deed. [26]

Des développements plus récents permettent notamment de considérer le cas d'une bobine avec noyau magnétique sur une pièce plane [19] ou le cas d'une bobine à air inclinée sur une pièce plane (Figure II .20)

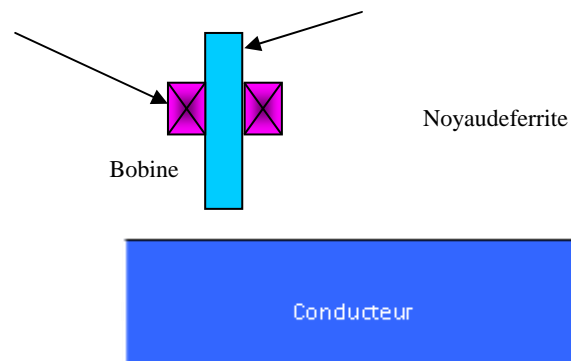


Figure II. 20 Bobine avec noyau au-dessus d'un demi-espace conducteur. [26]

Cependant, la complexité des configurations de CND par CF fait qu'une solution analytique est souvent soit impossible à obtenir, soit très complexe et très coûteuse en ressources

de calcul. Une alternative est alors de mettre en œuvre des méthodes numériques. [26]

II.7.4.b. Méthodes semi analytiques

Ce sont méthodes mixtes, qui sont une combinaison de méthodes analytiques couplées à des méthodes numériques. Ces méthodes ne sont appliquées que pour résoudre certains types de problèmes. Cette approche nous permet d'obtenir des expressions analytiques faciles à résoudre et de réduire le temps de simulation tout en ayant des résultats assez proches de la réalité.

Pour la simulation du contrôle non destructif, nous avons choisi d'utiliser la méthode des grandeurs électromagnétiques couplées. Le modèle développé sur la base de circuits couplés est proposé dans le domaine du chauffage par induction par Delage et Ernest. L'inducteur et la charges ont discrétisés en spires concentriques à l'intérieur desquelles la densité de courant est supposée constante. L'ensemble ainsi défini forme un réseau de résistances, d'inductances et de mutuelles couplées qui est représenté par un système d'équations analytiques. La résolution numérique de ce système permet de donner la valeur de la différence de potentiel aux bornes de la bobine ainsi que la répartition de la densité de courant dans l'ensemble du système. On peut ainsi connaître la valeur de l'impédance de la bobine, puis évaluer la valeur de la puissance injectée dans la charge. Cette méthode a été appliquée pour la première fois dans le domaine du contrôle non destructif par courant de Foucault par Mouche. Le modèle est ensuite étendu au cas d'un inducteur muni d'un pote ferrite en introduisant le principe des courants fictifs sur le contour du noyau, [13], [22].

II.7.4.c. Méthodes numériques

Les formulations magnétodynamiques précédemment exposées sont des équations aux dérivées partielles sous forme continue. Elles peuvent être résolues par l'une des méthodes numériques suivantes :

La méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments de frontière (BEM), la méthode des intégrales de volume, la méthode des volumes finis (FVM) et la méthode des éléments finis, [11]

II.8.6.c.1 Méthodes des différences finis (MDF)

C'est une méthode numérique simple à mettre en œuvre, est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles, en particulier celles concernant les problèmes de champs électromagnétiques. Cette méthode en 2D, consiste à mailler le domaine de résolution en éléments rectangulaires. En discrétisant aux nœuds du maillage l'équation 3.26 et en tenant compte des conditions aux limites appropriées et des conditions de passages entre les différents

milieux, on aboutit à un système algébrique. La méthode des différences finies s'adapte difficilement aux géométries complexes. En plus, elle n'aboutit qu'aux valeurs nodales du vecteur potentiel, ce qui exige une interpolation pour déterminer les valeurs d'A en d'autres points du domaine de résolution si c'est nécessaire [18]

II.8.6. c.2. Méthodes des éléments finis (MEF)

La méthode La méthode des éléments finis (FEM) est capable d'analyser des distributions de champ magnétique dans tous les dispositifs puisqu'elle peut inclure tous les détails de structure, de matériel et d'excitation. Afin d'obtenir l'exactitude acceptable de l'analyse finie d'élément, la machine doit être coupée en nombre énorme d'éléments géométriques. On assume que les valeurs de champ sont une fonction simple de la position dans ces éléments, permettant l'interpolation des résultats. Le temps requis pour calculer la distribution de champ, cependant, pourrait être très long, particulièrement dans l'étape d'optimisation de conception, qui a besoin d'un grand nombre d'itérations pour atteindre une conception optimum. C'est seulement possible avec les ordinateurs à grande vitesse avec de grandes RAM (mémoire à accès sélective) et il suggère que la méthode d'élément finis puisse ne pas être la méthode la plus efficace pour résoudre les problèmes journaliers dans la conception des systèmes électriques.

Cette méthode est très couramment employée lors de l'étude des systèmes électromagnétiques complexes. Elle permet d'obtenir des résultats de calcul avec une bonne précision et d'étudier de façon précise la répartition interne du flux magnétique, en prenant en compte les phénomènes de saturation et de création de courants de Foucault à l'intérieur des matériaux. Cette méthode est fondée sur la résolution des équations de Maxwell, [14].

II.8.6. c.3 Méthodes des intégrales de frontières (MIV)

Elle repose sur la résolution des équations intégrales précédemment citées. Une fois les fonctions de Green correspondant à la géométrie étudiée obtenues, les champs électrique et magnétique dus à l'interaction capteur-cibles sont déterminés par convolutions entre ces fonctions de Green et les sources (électriques ou magnétiques) mises en jeu. En pratique ces équations intégrales sont discrétisées par la méthode des moments :

Les champs et les grandeurs constitutives électromagnétiques sont supposés constants dans des cellules élémentaires cubiques. La résolution numérique s'effectue alors par inversion itérative. [11]

II.8.6.c.4 Méthodes des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation utilisée en particulier en mécanique des fluides. La méthode des volumes finis a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie : transfert thermique, électromagnétisme ...etc. La méthode

Consiste à subdiviser le domaine d'étude Ω en volumes élémentaires (tétraèdres, hexaèdres, prismes...etc.) de telle manière que chaque volume entoure un nœud. L'équation EDP du problème est intégrée sur un volume élémentaire. Afin de calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, ...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Par rapport aux éléments finis, [21].

II.7.5. Modes d'excitation

L'extraction de l'information sur la pièce à contrôle résiliée au mode d'excitation de la sonde. On peut distinguer trois modes d'excitation :

II.7.5.a. Excitation mono fréquence

Les courants de Foucault sont induits par une excitation sinusoïdale, de fréquence fixe. Le choix de la fréquence dépend essentiellement de l'application visée et de la sensibilité aux paramètres recherchés. Elle devra cependant se situer dans une gamme raisonnable.

Pour une fréquence trop basse, l'amplitude des courants de Foucault sera faible et la précision de mesure insuffisante à cause des bruits.

Une fréquence trop élevée fait apparaître des phénomènes parasites capacitifs, engendrés notamment par les capacités inter-spires de la sonde.

Cette méthode simple et parfois suffisante présente cependant des limitations car elle permet difficilement d'éliminer l'influence de l'ensemble des grandeurs perturbatrices, [02] [22]. [27]

II.7.5.b. Excitation multifréquences

Les courants de Foucault multifréquence, utilisent des signaux de courant d'excitation à plusieurs fréquences en même temps.

En raison des différentes profondeurs de pénétration des signaux d'excitation à différentes fréquences dans le conducteur, les courants de Foucault multifréquence peuvent obtenir des informations sur les défauts à plusieurs profondeurs d'une part et améliorer la

précision de la détection des tests de courants de Foucault, d'autre part. L'analyse contribue à l'élimination des facteurs d'interférence, améliorant considérablement la capacité de détection de la technologie de test par courants de Foucault. Cependant, les courants de Foucault multifréquences ne peuvent fournir que des informations de détection limitées et il est parfois difficile d'obtenir une mesure précise des défauts. [28].

II.7.5.c. Excitation pulsé

Elle consiste Elle consiste à émettre un champ magnétique à large bande de fréquence. Le courant d'excitation n'est pas une onde sinusoïdale mais variable dans le temps. C'est une excitation i pulsionnelle de formes rectangulaires, triangulaires ou autres. Toutefois, on préfère utiliser une forme semi sinusoïdale en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

La décomposition en série de Fourier de l'onde engendre des signaux de fréquences multiples. Cette méthode représente donc une alternative à l'excitation multi fréquence. On utilise l'évolution temporelle des signaux pour extraire des informations. Une telle technique est plus riche en informations qu'en mono fréquence ou en multi fréquences.

Cette technique a été utilisée pour évaluer l'épaisseur de revêtements et les dépôts sur les pièces métalliques, pour la détection des défauts profonds et dans le domaine de l'inversion du phénomène [24]

II.7.6. Control non destructif par courant de Foucault Pulsé

II.7.6.a. Introduction sur CND par CF pulsé

Dans le contrôle non destructif on trouve deux techniques de contrôle par courants de Foucault ; la plus utilisée est la technique de contrôle par courants de Foucault classique qui utilise un champ électromagnétique sinusoïdal pour créer les courants d'induction. Elle est surtout applicable pour la recherche de défauts surfaciques, ou sub-surfacique. Par contre la méthode de contrôle par les courants de Foucault pulsé dérive de la précédente ou le champ électromagnétique est généré par une impulsion de courant. Elle est très sollicitée pour le contrôle des matériaux multicouche et d'épaisseur plus importante.

Dans cet article nous allons présenter l'application des courants de Foucault pulsé dans la caractérisation de la conductivité électrique des matériaux et l'étude de certains défauts (rainures, absence de la matière).

II.7.6.b. Courant de Foucault pulsé

L'utilisation de courants pulsés conduit à une technique particulière en courants de Foucault, qui consiste à exciter la bobine sonde par des impulsions plutôt que par une tension sinusoïdale entretenue. L'onde électromagnétique ainsi engendrée se propage dans le matériau et

est recueillie par une sonde réceptrice distincte et protégée du rayonnement direct de la bobine émettrice ; le caractère « pseudo échographique » des signaux les rend sensibles à la nature interne du matériau, ce qui explique que cette technique est utilisée pour la mesure d'épaisseur de revêtement et pour la détection de défauts sous-cutanés, lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser un contrôle ultrasonore, [1].

II.7.6.c. Avantage de la technique a courant pulsé

Excitation d'une gamme étendue de fréquences avec une impulsion simple ;

- Choix de fréquence à partir de la réponse de cette technique semblable à la technique multifréquence,
- Une acquisition de données plus rapide qu'avec la EC multifréquence,
- Détection efficace de fente et de corrosion dans le fuselage des structures complexes,
- La possibilité d'analyse multifréquence après l'accomplissement du balayage,
- L'application de la technique en 2D fournit la formation d'image instantanée du secteur sous la sonde, [25].

II.7.6.d. Système expérimental CND par CF pulsé

La différence majeure dans le contrôle par courants de Foucault pulsés et courants de Foucault classique est dans, le champ d'excitation qui est très important. Il consiste à exciter une sonde a CF avec un signal carré et mesurer la différence de potentiel aux Bornes de la sonde de réception. Ce système est basé sur la décharge rapide de la Capacité à travers la bobine pour [25]

-

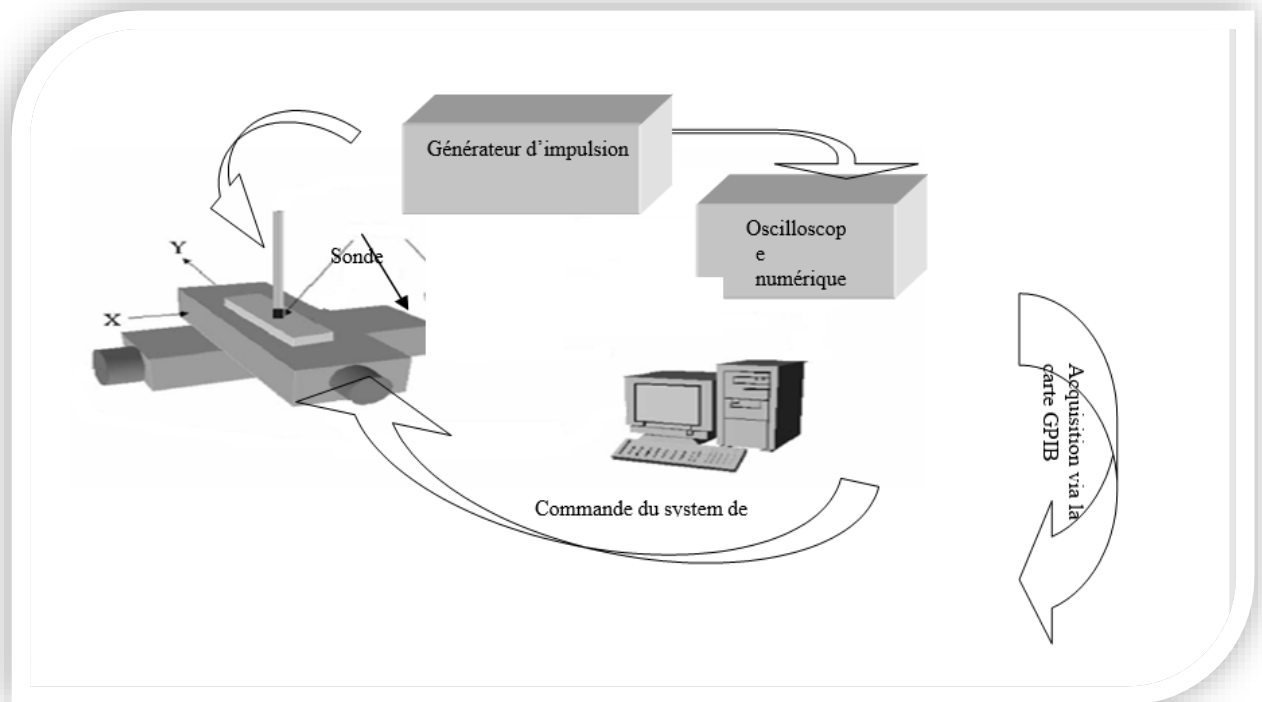


Figure II. 21 Chaîne de contrôle par courants de Foucault pulsé, [25]

II.7.7. Intérêt de la modélisation

Le CND. Par courants de Foucault est largement employé pour inspecter les matériaux électriquement conducteurs. Dans ce contexte, les outils de simulation permettent d'étudier les interactions sonde-pièce et jouent un rôle croissant pour concevoir les systèmes de contrôle et démontrer leurs performances.

La modélisation électromagnétique permet de simuler l'interaction sonde-pièce testée et de définir une structure de sonde adaptée à un problème donné. Ainsi il est possible de prévoir les conséquences de différents choix (configuration géométrique, choix de matériaux,) sans avoir à réaliser de prototypes multiples. Dans le domaine du CND par courants de Foucault la modélisation numérique est ainsi devenue, grâce à la performance du matériel informatique, un acteur important dans la conception de sondes. [02] [22].

II.7.8. Formulation en potentiel vecteur-V

Il existe deux familles de formulations pour la résolution des équations de Maxwell. L'une repose sur le calcul du champ électrique et l'autre sur le calcul du champ magnétique

Cependant du fait des fortes discontinuités de certaines variables aux interfaces entre deux régions de propriété différentes, la résolution directe des équations de Maxwell est délicate. Pour faciliter la résolution, ces équations sont transformées en équations de potentiels.

Ceci conduit à la définition des formulations duales en potentiels combinés. La formulation la plus connue est la formulation en $A^{\vec{}} - V$.

Cette formulation utilise le potentiel vecteur magnétique $A^{\vec{}}$ dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique V uniquement dans les régions conductrices [02] [19]

II.8. Modélisation Mathématique de System CND-CF

Tous les phénomènes d'électromagnétismes variables dans le temps et dans l'espace dans nos études des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de maxwell suivantes, [12] [13] [21].

Loi de Maxwell Faraday (induction)

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{II.1}$$

Loi de Maxwell Gauss (électrique)

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho \tag{II.2}$$

Loi de Maxwell Ampère

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{II.3}$$

Loi de Maxwell Gauss (magnétique)

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \tag{II.4}$$

\vec{E} [V/m] et \vec{H} [A/m] : Champ électrique et mag

\vec{D} [A. s/m] et \vec{B} [T] : Induction électrique et ma

\vec{j} [A/m²] et ρ [C/m³] : Densité du courant et la

Tel que

$$\vec{j} = \vec{j}_{\text{ind}} + \vec{j}_{\text{exi}} \tag{II.5}$$

Avec :

\vec{j}_{ind} : La densité de courant induit.

\vec{j}_{exi} : La densité de courant d'excitation.

Ces équations sont liées entre eux par les lois constitutives qui et magnétiques du milieu considéré sont, :

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \mu = \mu_0 \mu_r \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

μ [H/m] : Perméabilité magnétique.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m] : Perméabilité magnétique du vide.

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

ϵ [F/m] Permittivité diélectrique.

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m]: Constante diélectrique du vide

ϵ_r : Permittivité électrique relative du milieu.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

Ou σ [S.m⁻¹] : Conductivité électrique.

Suivant les dispositifs que l'on étudie certains phénomènes deviennent négligeables (régimes quasi stationnaires), ce qui va nous donner des équations découplées plus simples à résoudre, ajouté aussi que certaines hypothèses simplificatrices sont introduites, dans notre cas d'étude nous allons considérer que, [13] [14] [15] :

Dans un milieu conducteur σ est de l'ordre de 10^6S.m^{-1} , et ϵ_0 de l'ordre de $8.85 \cdot 10^{-32} \text{F/m}$ jusqu'à des fréquences qui avoisinent les MHz nous avons $\omega \cdot \epsilon_0 \ll \sigma$

ce qui nous permet d'avoir : $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$

La densité volumique de charge est considérée comme nulle ($\rho = 0$). Les paramètres σ, μ, ϵ , sont considérés linéaires, donc ils ne dépendent pas de la solution du système.

Le dispositif est alimenté par une tension sinusoïdale. Toutes ces hypothèses considérées, le système d'équation devient, [13] [12] [22] :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{div}(\vec{D}) = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II.12})$$

II.8.1. Relations de continuité et conditions aux interfaces

La méthode des éléments finis, lorsque l'inconnue recherchée aux nœuds est le potentiel vecteur magnétique, impose la continuité à l'interface de deux milieux de nature différente. Si A_1 et A_2 sont respectivement les potentiels du milieu 1 et 2 à l'interface alors [12] [13] [19] [33] [34] :

$$A_1 = A_2 \quad (\text{II.13})$$

La continuité du potentiel assure la continuité de la composante normale de l'induction magnétique à l'interface. Compte tenu des équations de passage qu'on rappelle ci-après, [12] [13] [23] [21] :

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) &= 0 \\ \vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) &= 0 \\ \vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) &= \rho_s \\ \vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) &= \vec{K} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

\vec{n} : Le vecteur normal à la surface. \vec{K} : représente la composante de la densité de courant perpendiculaire à l'axe du plan. De plus les vecteurs ont généralement trois composantes augmentant de ce fait le nombre d'inconnues, et par la même le temps de calcul, [02] [32] [12]

Pour pallier à ce problème, on fait appel à une entité purement mathématique connue sous le nom de potentiel, si ce potentiel n'a aucun sens physique, sa variation, elle, est très significative, [12].

La relation (II.12) nous renseigne sur l'existence d'un vecteur \vec{A} et nous permet d'écrire [23] :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{II.15})$$

Pour assurer l'unicité de la solution nous allons imposer une condition de jauge (condition de coulomb) de telle sorte que :

$$\text{div}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{II.16})$$

En remplaçant (II.13) dans (II.9), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = -\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) \quad (\text{II.17})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II.18})$$

On remarque que la quantité $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$ est conservée donc c'est une dérivée d'un potentiel V alors :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II.19})$$

Alors la loi d'ohm (II.8) est :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V)\right) \quad (\text{II.20})$$

Ce qui permet de définir les deux densités de courant cité précédemment :

$$\begin{aligned} \vec{j}_{\text{ind}} &= -\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{j}_{\text{exi}} &= -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V) \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

On remplace (II.17) dans (II.11) on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \sigma \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{grad}}(V)\right) \quad (\text{II.22})$$

La combinaison entre l'équation (II.6) et (II.13) donne :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant (II.18) dans (II.19), on tenant compte que l'alimentation est sinusoïdale $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ on obtient :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} \\ = \vec{j}_s \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

ω : La pulsation d'alimentation

$j^2 = -1$: Nombre complexe

Avec:

$$\vec{j}_s = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II.25})$$

L'équation (II.20) représente l'équation de la magnétodynamique transitoire en terme de potentiel vecteur magnétique \vec{A} avec un terme source.

Dans la plupart des problèmes de modélisation, les phénomènes électromagnétiques dans le domaine du contrôle non destructif réalisés jusqu'à présent, considèrent une bobine inductrice ou le courant est imposé, une région ferromagnétique ou conductrice qui représente la cible à contrôler et la troisième région qui représentera l'air environnant, [12] [33] [34].

L'adaptation de l'équation (II.20) aux différentes régions constituera le dispositif d'étude et nous permet d'écrire :

Dans l'air :

La région qui entoure le dispositif est caractérisée par l'absence de source ainsi qu'une conductivité électrique nulle, l'équation qui lui sera associée s'écrira :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = 0 \quad (\text{II.26})$$

II.8.1.a. Dans l'inducteur :

Les inducteurs sont des fils fins de cuivre, l'équation (II.20) pourra alors s'écrire sur la forme suivante :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \vec{j}_s \quad (\text{II.27})$$

II.8.1.b. Dans la cible :

La pièce à contrôler est obligatoirement conductrice, l'équation électromagnétique dans cette région s'écrit alors [13] [12][14] :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}(\vec{A})\right) + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{II.28})$$

La figure (II.22) illustre les équations du vecteur potentiel dans des différentes régions

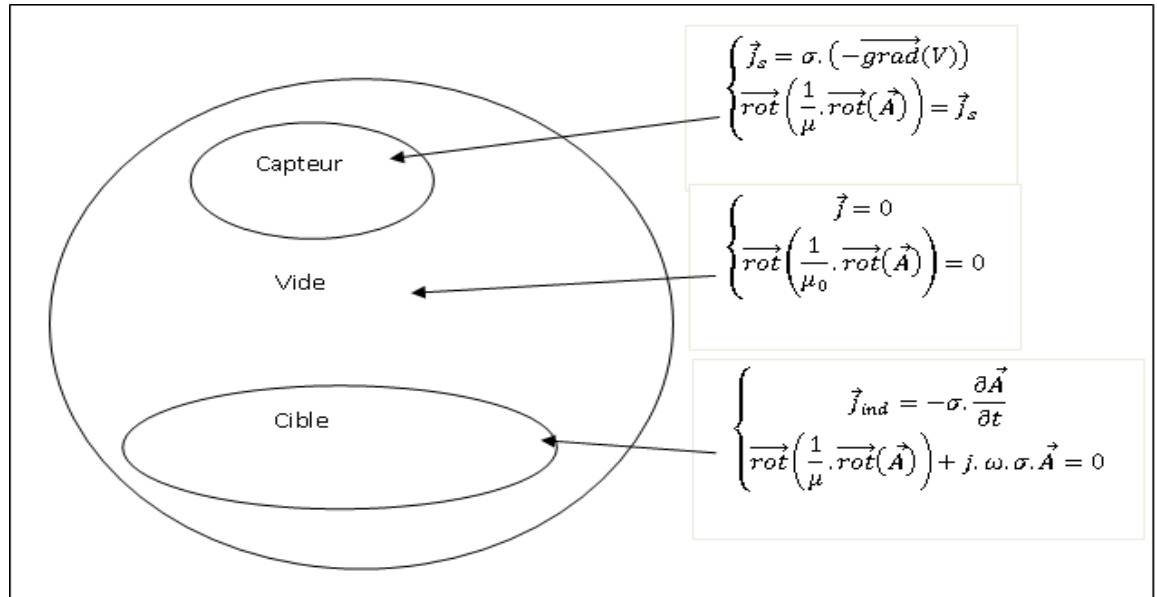


Figure II. 22 Potentiel A dans les différentes régions. [12]

II.8.2. Équations magnétodynamique bidimensionnelle :

Dans les problèmes bidimensionnels on peut avoir deux types :

Le premier concerne les systèmes à symétrie transrionnelle, ou aucune variation n'est enregistrée sur l'une des trois directions d'un plan cartésien. On choisit généralement l'axe (oz), [12] [19]

Dans l'autre cas on trouve les systèmes axisymétriques, ou aucune variation n'a lieu le long de la direction ortho radiale (φ). Dans un plan cylindrique (r, φ, z)

Le potentiel vecteur dans ce cas n'a qu'une seule composante parallèle à (oz). A partir (II.8) et (II.16) , il vient que \vec{A} et \vec{E} doivent être dans la même direction que \vec{j} alors

$$: \quad \vec{A}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, A_z) \quad \text{et} \quad \vec{j}(\mathbf{0}, \mathbf{0}, j_z).$$

En coordonnée cylindrique le potentiel vecteur magnétique ne présente que la composante ortho radiale, d'où : $\vec{A}(\mathbf{0}, A_\varphi, \mathbf{0})$ et $\vec{j}(\mathbf{0}, j_\varphi, \mathbf{0})$.

D'où l'équation du rotationnel peut s'écrire en coordonner cartésiennes :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] \cdot \vec{k} \quad (\text{II.29})$$

Avec \vec{k} le vecteur unitaire selon Oz

Et en coordonner cylindriques :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})\right) = \left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] \cdot \vec{u}_\varphi \quad (\text{II.30})$$

Avec \vec{u}_φ le vecteur unitaire selon la direction orthogonale.

II.8.2.a. Dans l'air :

En coordonnée cartésienne

$$\left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = 0 \quad (\text{II.31})$$

En coordonné cylindrique

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = 0 \quad (\text{II.32})$$

II.8.2.b. Dans l'inducteur :

En coordonnée cartésienne

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] = j_z \quad (\text{II.33})$$

En coordonnée cylindrique

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] = j_{S\varphi} \quad (\text{II.34})$$

II.8.2.c. Dans la charge :

En coordonnée cartésienne

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\mu \partial y} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_z}{\partial t} = -j_z \quad (\text{II.36})$$

En coordonnée cylindrique

$$\left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\varphi}{\mu \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot A_\varphi)}{\mu \partial r} \right) \right] - \sigma \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.37})$$

Ces équations étant posées, leurs solutions dépendent entièrement des conditions de limites qui lui seront associées on peut distinguer trois sortes de conditions aux limites qu'on peut généralement rencontrer, [02]

II.8.3. Conditions aux limites :

Condition de Dirichlet (ou condition du premier problème aux limites): on cherche une solution de l'équation qui prend des valeurs données sur le bord du domaine, on cherche donc à résoudre le système d'équation, [12][02][13][19][20]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ A = A_0 & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (II.38)$$

Condition de Neumann (ou condition du deuxième problème aux limites) : on cherche la solution de l'équation différentielle dont on connaît la valeur du gradient sur le bord du domaine de résolution, notant que n la normale unitaire dirigée vers l'extérieur de Ω , on cherche donc à résoudre le problème, [12][33]:

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial n} = A_n & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (II.39)$$

Condition de mixte (ou condition de Dirichlet Neumann): on cherche une solution qui vérifie la troisième condition de bord qui est, [12] [16] :

$$\begin{cases} \Delta A = f & x \in \Omega \\ a \cdot A + b \cdot \frac{\partial A}{\partial n} = c & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (II.40)$$

Où :

a, b sont des constantes et A est l'inconnu du problème.

On note que :

Δ : L'opérateur Laplace

f : Terme source.

Ω : le domaine d'étude.

$\partial\Omega$: le bord du domaine d'étude.

II.9. Méthode des éléments finis (MEF)

L'équation qui régit notre système étant formulée, pour résoudre cette équation. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, d'une manière tout à fait générale, on peut classer les méthodes de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, en deux grandes catégories, Les méthodes numériques et les méthodes analytiques

Dans les méthodes de résolution des équations EDP numériques les plus utilisées sont : la méthode des différences finies qui consiste en l'approximation de l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences, ou chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution.

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations différentielles aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème.

Elle est soit une formulation vibrationnelle ou une formulation résidus pondéré. Dans ce qui suit nous utiliserons la méthode des éléments finis pour la résolution de l'équation magnétodynamique. [18] [02].

II.9.1. Principe de la méthode vibrationnelle

La méthode variation elle nécessite la connaissance à priori de la fonctionnelle d'énergie du système à étudier. Celle-ci est déterminée par le principe de l'action Hamiltonienne qui stipule l'existence d'un fonctionnel type intégral défini par [02] [21] [20]

$$f(A) = \int_{\Omega} f d\Omega \quad (\text{II.41})$$

f : est la fonction de la grange résultant de la Co énergie du système de type cinétique et de son énergie potentiel.

Ω : est le domaine d'étude.

La résolution du problème variation elle définit par la fonction d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonctionnelle. [3]

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F}{\partial A_n} = 0 \quad (\text{II.42})$$

n : Nombre de nœud dans le domaine d'étude.

A : Inconnue au nœud n du domaine.

II.9.2. Principe de Formulation résidus pondérés

Le principe de la méthode des résidus pondérés est de remplacer la solution exacte par une solution approchée ce va engendrer une erreur appelée résidu R .

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{II.42})$$

R_i : est le résidu de l'approximation

$L(A)$: opérateur différentiel.

f : fonction définie sur le domaine d'étude Ω

A : l'inconnue à chercher

A l'aide de fonction de pondération bien choisie, on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en N points du domaine Ω .

$$\int_{\Omega} R_i \Phi_i \partial \Omega \quad (\text{II.43})$$

Φ_i : Fonction de pondération ou de projection. Les valeurs du potentiel A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

Plusieurs méthodes peuvent être déduites de la formulation résidus pondérés, ces dernières sont essentiellement liées au choix des fonctions de pondérations, parmi elles on citera :

- La méthode de La méthode de collocation par points, ou les fonctions de Dirac sont prises comme fonctions de pondérations ou on impose au résidu de s'annuler dans chaque point ou on veut approcher la solution.
- Méthode des moindres carrés qui est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites.
- La méthode de Galérien qui consiste à choisir des fonctions de projections identiques aux fonctions d'approximation, qui donne à la fin un système algébrique symétrique facile à résoudre.

II.9.3. Organigramme de résolution des EDP par la méthode des éléments finis

Pour résoudre l'équation magnétodynamique on accomplira plusieurs étapes pour définir la solution du problème, ces étapes peuvent se résumer sous la forme de l'organigramme suivant, Figure (II.23),

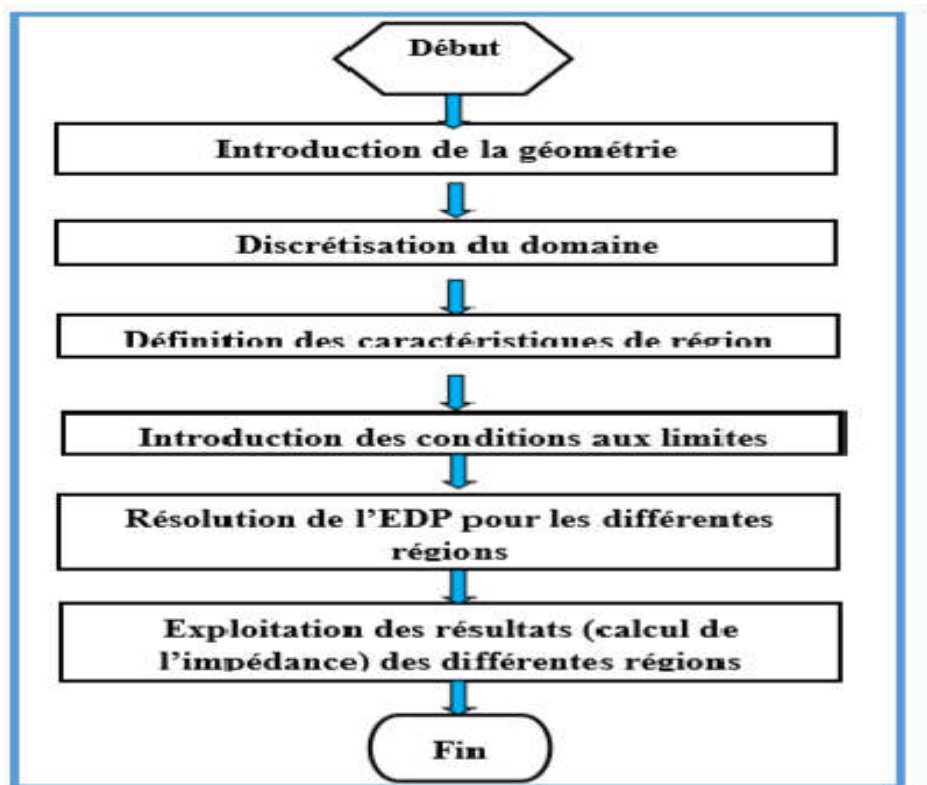


Figure II. 23 Organigramme de calcul par élément finis, [2].

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technique du CND par les CF et ce chapitre décrit la modélisation des appareils CND par CF et les différents types de capteurs et de bobines et modes de contrôle et types d'excitation mono fréquence, multifréquence et pulsée sont introduits, nous proposons donc les formules utilisant le potentiel vecteur magnétique et électrique potentiel scalaire A^2 -V pour générer les équations magnétodynamiques quasi-stationnaires régissant notre système

Le logiciel COMSOL Multiphasiques est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire et un outil logiciel de simulation en ingénierie qui facilite le processus de modéliser à tous les niveaux - définition de la géométrie, maillage, spécification de la physique, optimisation, et visualisation des résultats c'est à dire de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. C'est pour ces particularités qu'on a décidé d'utiliser ce logiciel comme outil de simulation pour le contrôle non destructif par capteurs à courants de Foucault à champs magnétiques rotatifs qui sera le sujet du chapitre suivant. [2]

Chapitre III :

Simulation d'un système de détection de défauts internes de corrosion par CND-CF

Chapitre III . Simulation d'un Système de détection de défauts internes de corrosion par CND-CF

III.1. Introduction

Durant leur procédé de production, les industries sont exposées à un problème particulièrement grave : les surfaces métalliques des tuyauteries, des chaudières et des réservoirs sont victimes de la corrosion. La corrosion est un procédé chimique qui détériore le matériau, réduit l'épaisseur originale du métal et peut provoquer des fuites ou des pertes du matériau ou liquide.

La corrosion n'est pas souvent détectable par une inspection visuelle, car il serait pour cela nécessaire de découper ou de démonter la tuyauterie, la chaudière ou le réservoir. Si on laisse la corrosion agir trop longtemps, sans la détecter, elle diminuera la résistance des surfaces et provoquera probablement des défauts structurels graves. Aussi bien pour la sécurité que pour des considérations économiques, les structures métalliques doivent être inspectées régulièrement.

Dans cette partie, en utilisant la modélisation par éléments finis (MEF), l'interaction d'une sonde inductive absolue avec des défauts internes de corrosion, sera simulée dans un espace tridimensionnel (3D) pour résoudre le problème direct.

Les paramètres contribuant à des résultats de simulation par la MEF fiables, tels que la taille du défaut, sa position et la variation des paramètres de l'impédance en fonction de la position de la sonde, sont tous étudiés dans cette modélisation.

III.2. Généralités sur la corrosion

Il est largement reconnu que la détection par balayage des défauts souterrains tels que les fissures, la corrosion, les entrefers, les zones de décapage et les défauts de rivetage dans les structures multicouches conductrices est un sujet de recherche important dans un certain nombre de domaines allant de l'industrie aérospatiale au génie nucléaire. La corrosion et les autres défauts mentionnés sont des problèmes critiques des structures d'aéronefs en service qui entraînent une dégradation de l'intégrité de la structure et de la résistance à la fatigue et affectent directement la navigabilité d'un aéronef et entraînent même la perte de sections de revêtement de fuselage similaire à l'incident d'Aloha Airlines en 1988, [35]. En raison d'importants dommages dus à la corrosion dans les joints de recouvrement. L'essai par courants de Foucault est actuellement utilisé dans l'aérospatiale pour plus de 50 % de toutes

Les applications pour la détection de défauts cachés dans les revêtements de fuselage et les multicouches et pour clarifier l'état réel de la structure de l'aéronef en vue d'une réparation et d'une action corrective appropriées dans la mesure où les courants de Foucault.

La détection de l'espace d'air ou de corrosion dans les structures multicouches par la méthode de test CND-CF présente les avantages tel que, balayage sans contact, d'un faible coût et d'une vitesse d'inspection relativement rapide.

Cependant, la caractérisation et la reconstruction précises des défauts internes dans les multicouches métalliques à partir des mesures d'impédance de la bobine de sonde ECT posent toujours un défi majeur et à donc été un objectif de recherche dans les domaines CND,

Les résultats de la simulation des réponses de la bobine pour inspecter différents types de défauts, de différentes longueurs, formes et à différents emplacements en balayant des structures bicouches sont présentés et analysés, [35]

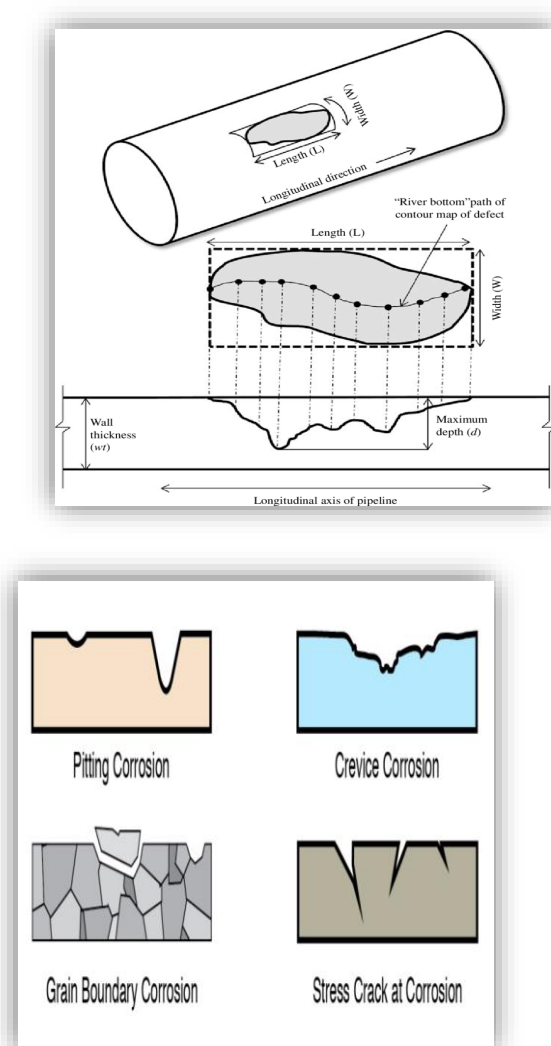


Figure III.1 Schéma d'emplacement de corrosion

III.2.1. Risques engendrés par corrosion

Toute rupture d'un équipement en fonctionnement est une catastrophe qui peut avoir des conséquences considérables, notamment :

La rupture d'une seule pièce peut entraîner la succession d'évènements catastrophiques qui détruiront d'autres pièces ou équipements en bon état, Figure (III.2).



Figure III.2 Exemple de CND-CF pour la détection de défauts de corrosion

Dans des cas plus graves, la non-détection de fissures peut se traduire non seulement par des catastrophes matérielles, mais également par des pertes en vies humaines. Citons, à titre d'exemple, ceux du nucléaire, de l'aéronautique, de l'automobile, des chemins de fer et de l'industrie chimique, Figure (III.3).



Figure III.3 Recherche de défauts de corrosion au voisinage des soudures de pipeline

III.3. Déroulement de Simulation sous COMSOL Multiphasiques

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. A gauche, on retrouve le Modèle où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (Paramètres), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Géométrie), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). Le Modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Staudt) et les options d'affichage et de post traitement des données (Résulta). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le Modèle, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Géométrie. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphiques) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, le progrès des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée. Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.6 sont présentés à la (Figure III.4), [21].

Les caractéristiques géométriques du modèle de la plaque conductrice 2 couches la 1^{ère} à 1mm d'épaisseur et 2^{ème} à 2mm d'épaisseur sont donnés par les Tableau III.

III.4.2. Caractéristique du système CND-CF à étudier

Le système d'inspection par CND-CF proposé est constitué par deux tôles conductrices (un système bicouches), d'un capteur travaillant en mode absolu et un domaine d'air englobant l'ensemble des éléments cités.

Les dimensions des différentes parties sont données ci-dessous :

- Plaques conductrices en Aluminium : Longueur de 60mm, largeur de 50mm, la 1^{ère} plaque à 1mm d'épaisseur et la 2^{ème} à 2mm d'épaisseur.
- Capteur 1,5*0,5*2mm (rayon extérieur*rayon intérieur* hauteur)
- Défaut : Longueur de 20mm, largeur de 4mm et une profondeur de 0.6mm
- La fréquence de 1600 Hz,
- La conductivité électrique des plaques en aluminium est de $18.5e^6$ [S/m]

Modèle géométrique

La représentation du système de contrôle par MFL sous COMSOL Multiphasiques est proposée

La figure suivante :

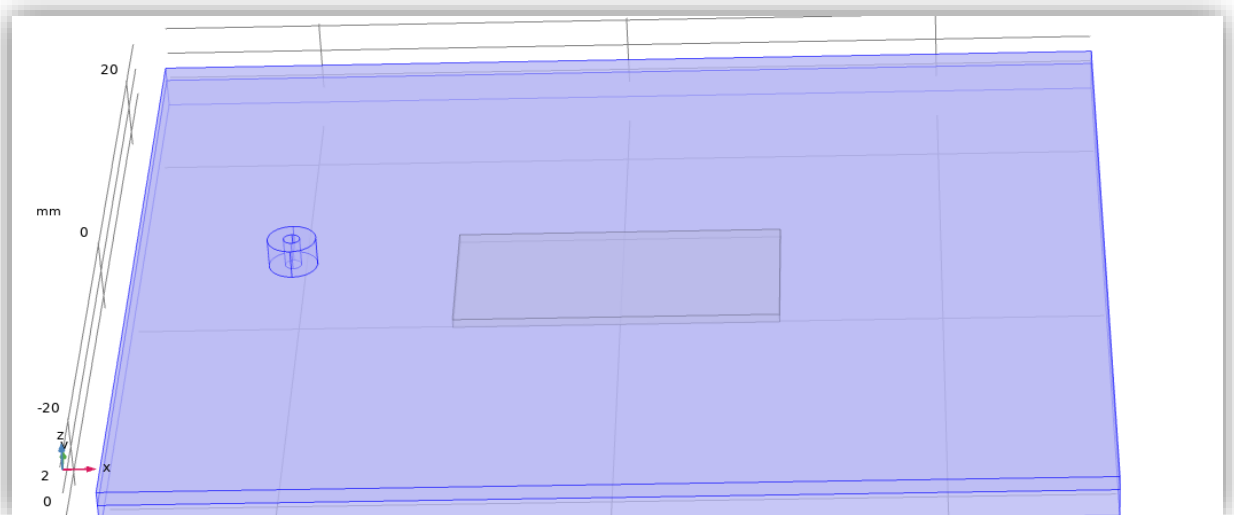


Figure III.6 Défaut de corrosion interne 10*4*0.6mm au fond 1^{ère} couche

Position du défaut :

La Figure suivante montre la position du défaut interne par rapport au système à étudier. C'est un défaut interne à 0.4 mm de profondeur.

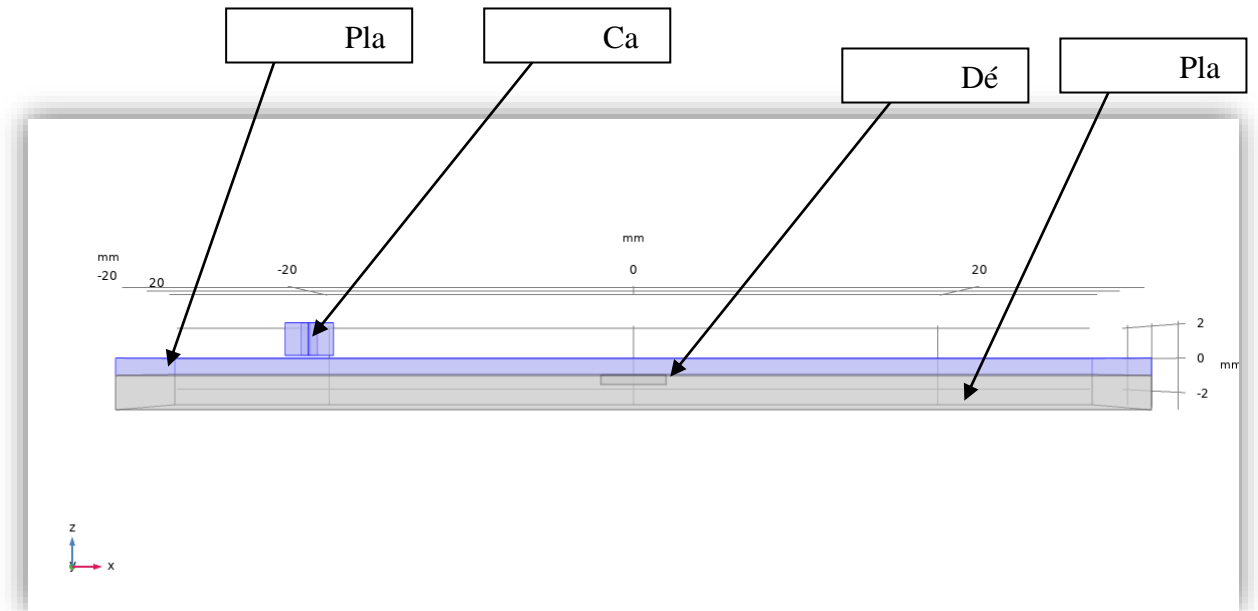


Figure III.7 Vue de la position défaut corrosion.

Maillage du système :

Chaque volume constituant le domaine d'étude doit être discrétisé avec des éléments géométriques qui forment un maillage sur les nœuds desquels les grandeurs physiques vont être déterminées numériquement. Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL Multiphasiques. Le type d'élément utilisé conditionne en partie le nombre de degrés de liberté nécessaire au final pour la résolution numérique du problème. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes.

Le choix de la taille des éléments conditionne fortement la précision de la solution numérique obtenue. Afin de décrire correctement les évolutions des grandeurs d'intérêt, il est nécessaire d'adapter la taille des mailles au problème que nous avons à résoudre. La difficulté de cette étape consiste à harmoniser les maillages entre les différents domaines afin d'optimiser le temps de calcul et la précision de la résolution. Comme le montre la figure ci-dessous.

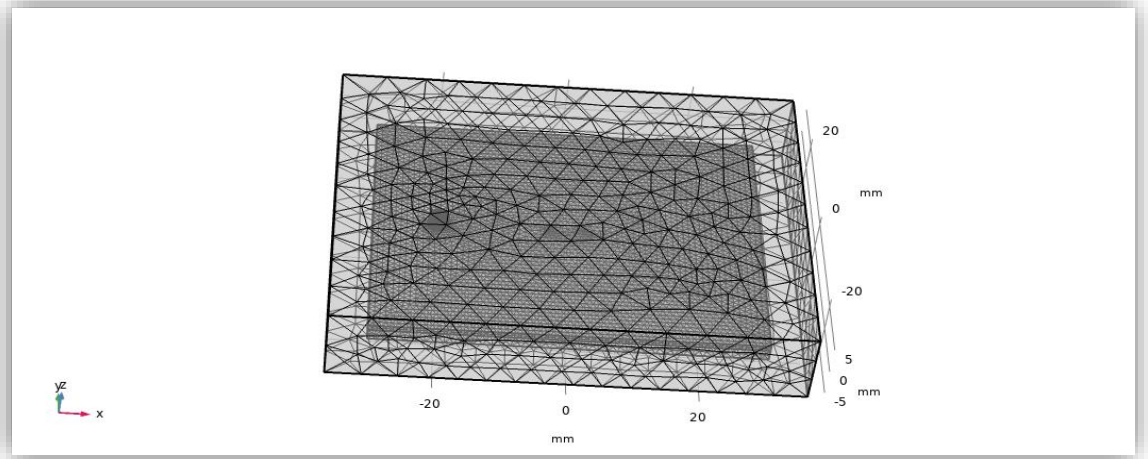


Figure III.8 Maillage du domaine d'étude

III.4.2.a. Résultats du balayage linéaire

Les figures (III.9 et 10) montrent respectivement la variation de l'impédance imaginaire et réelle du capteur, on peut constater l'amplitude commence à augmenter au voisinage de 10 mm (début du défaut) et atteint son maximum au centre du défaut interne de corrosion, de part et d'autre du défaut la variation de l'impédance est nulle (il n'y a pas de défaut).

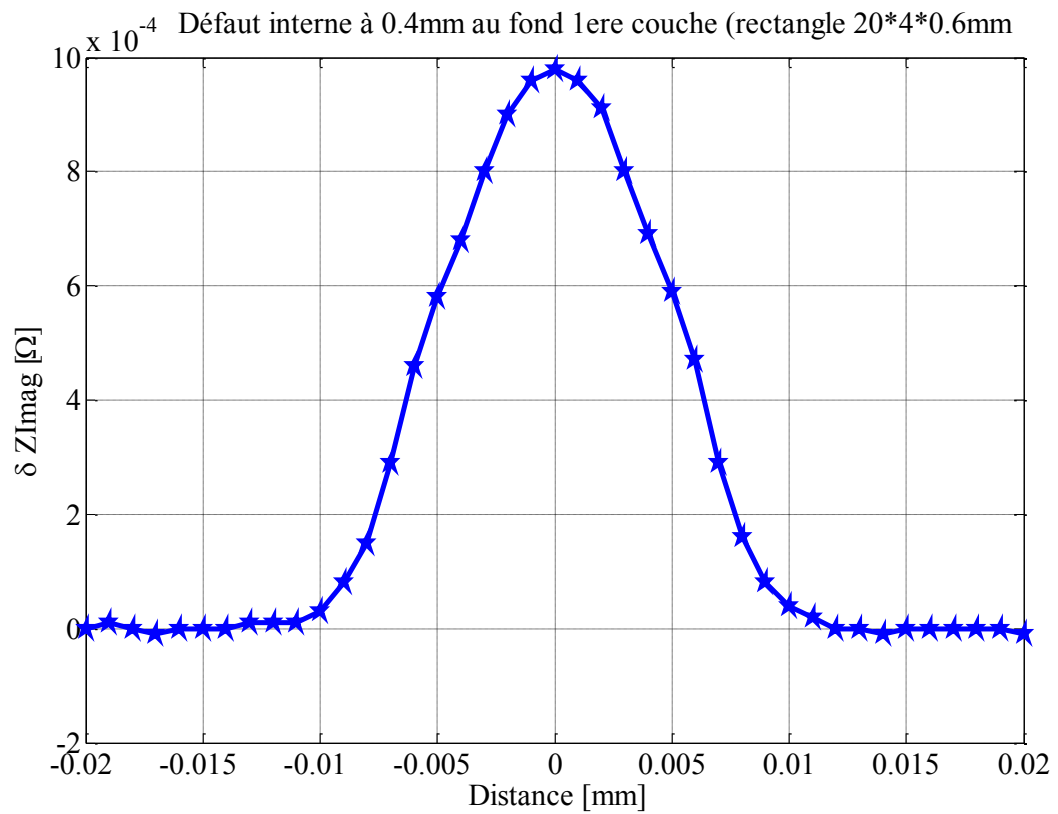


Figure III.9 Variation de la partie imaginaire de l'impédance du capteur.

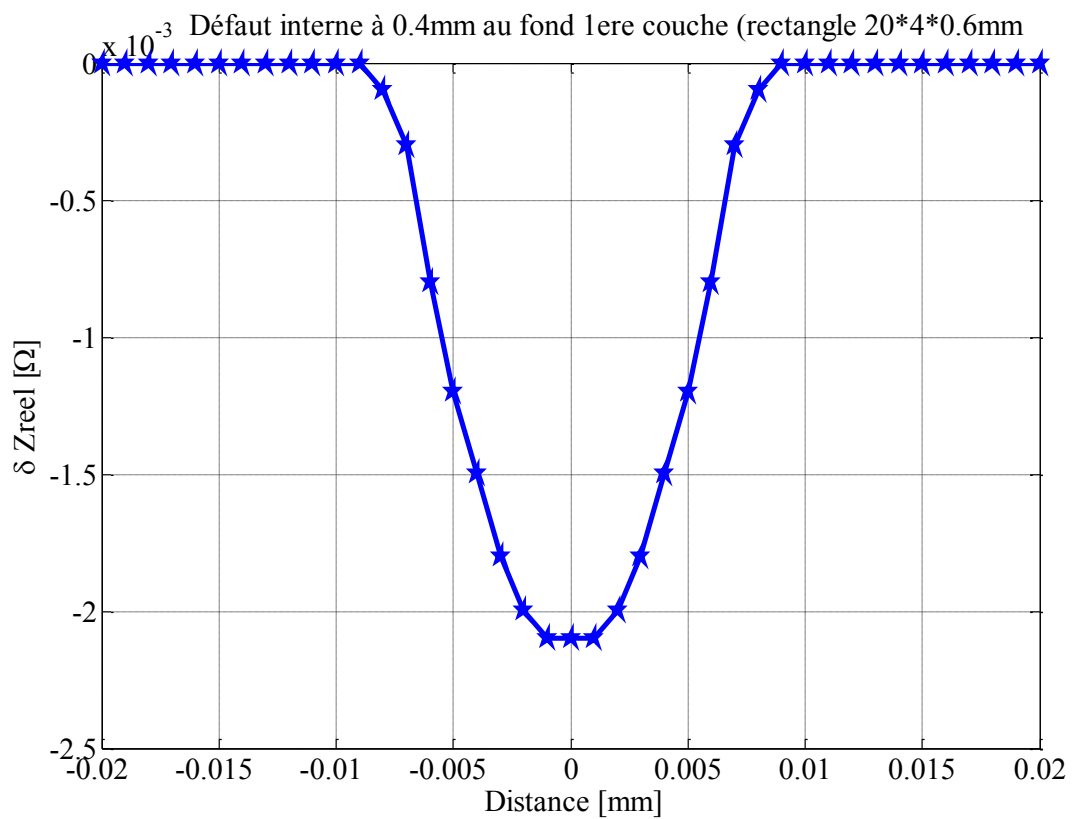


Figure III.10 Variation de la partie réelle de l'impédance du capteur.

III.4.2.b. Cartographie des courants induit

Les cartographies des courants induits sont données par les Figures (III.11, 12 et 13)

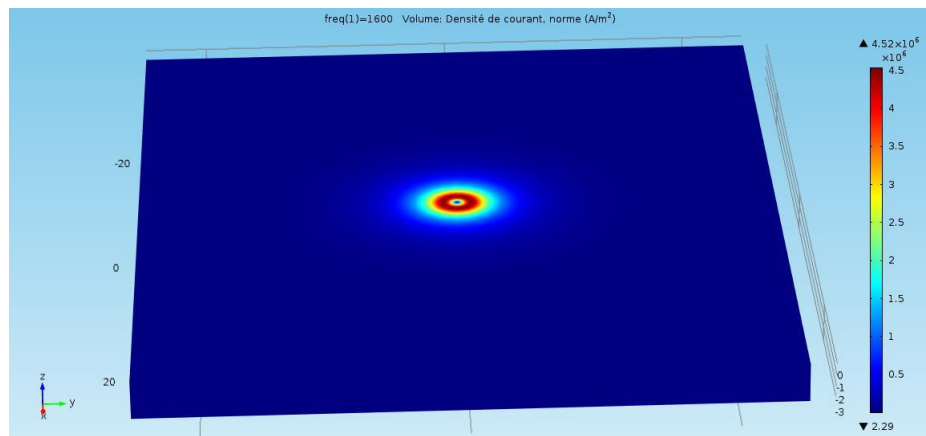


Figure III.11 Cartographie des courants induit « sans défaut » .

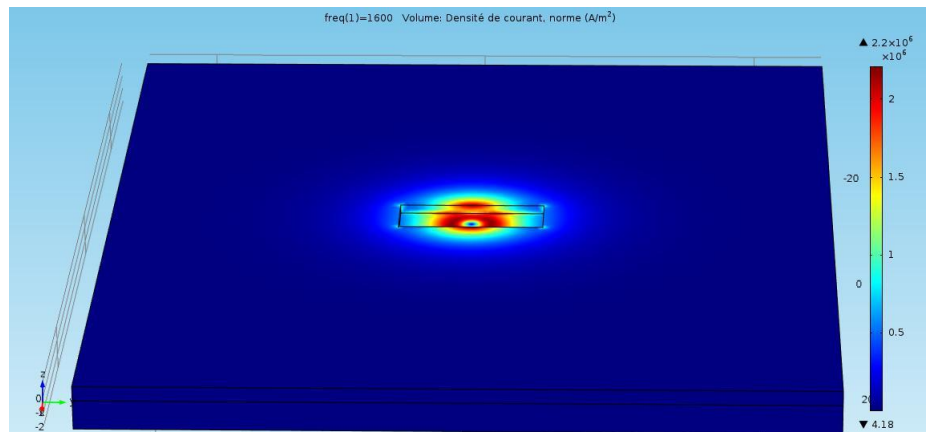


Figure III.12 Cartographie des courants induit « défaut externe» .

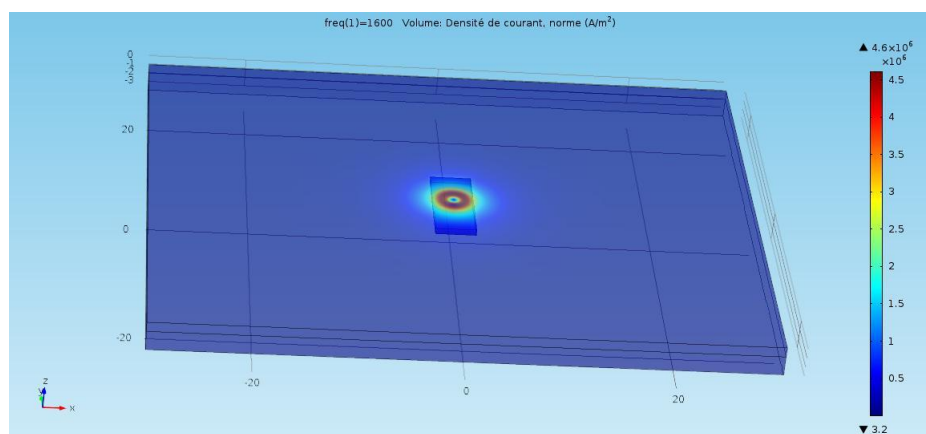


Figure III.13 Cartographie des courants induit « défaut interne» .

On peut constater clairement que la densité des courants induit est maximale en l'absence de défaut, car il n'a pas de perturbation de la trajectoire des courant, elle est minimale pour un défaut externe, car les lignes des courants induit sont modifiées par la

présence de défaut de corrosion externe, par contre cette même perturbation a une influence inférieure pour un défaut de corrosion interne. On peut admettre que notre système est validé car les résultats obtenus satisfaisants.

III.4.3. Effet de variation des paramètres du défaut sur les variations d'impédance

Après avoir implanté le modèle décrit précédemment sous COMSOL-multiphysics, nous procédons à l'étude de l'effet de la variation des paramètres d'un défaut parallélépipède sur la réponse du capteur

III.4.3.a. Effet de la longueur du défaut sur les variations d'impédances

En étudiant l'effet de la longueur de défaut sur la variation de l'impédance capteur-pièce, nous fixons la largeur de défaut à 4 mm et la profondeur à 0.6mm et le défaut est situé au fond de la première couche.

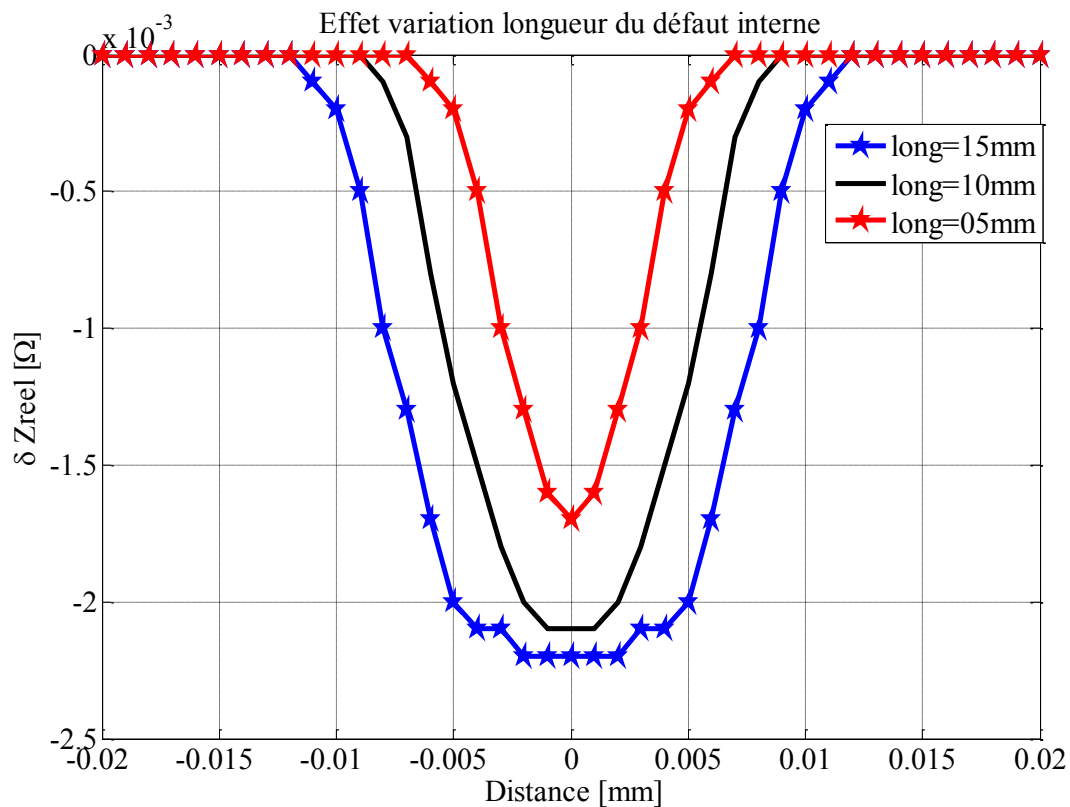


Figure III.14 Effet de variation de la longueur du défaut sur Z Réelle .

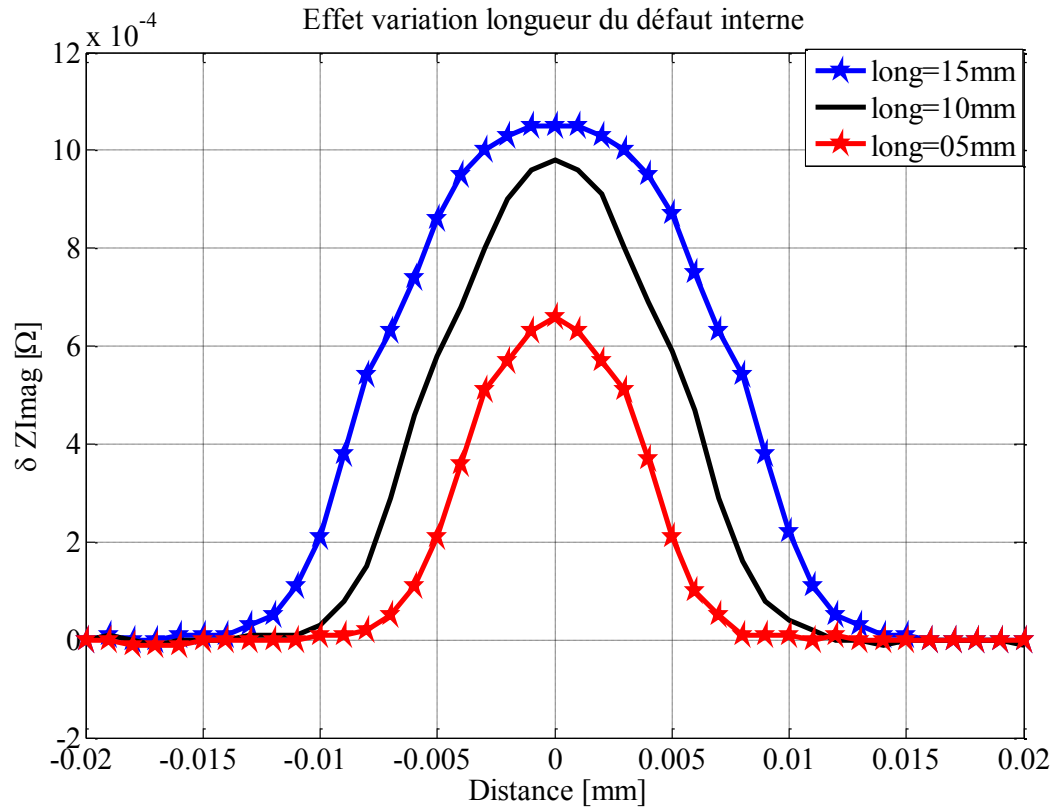


Figure III.15 Effet de variation de la longueur du défaut sur Z imaginaire.

III.4.3.b. Effet de la variation de la position du défaut interne

On fait varier la position du défaut par rapport aux couches.

- La première position : au fond de la première couche (à 0.6 mm de la surface)
- La deuxième position : au fond de la première couche (à 1.0 mm de la surface)
- La troisième position : au fond de la première couche (à 2.4 mm de la surface)

Les résultats montrent que plus le défaut interne est proche du capteur, la variation est plus importante, Figure (III.16 et 17).

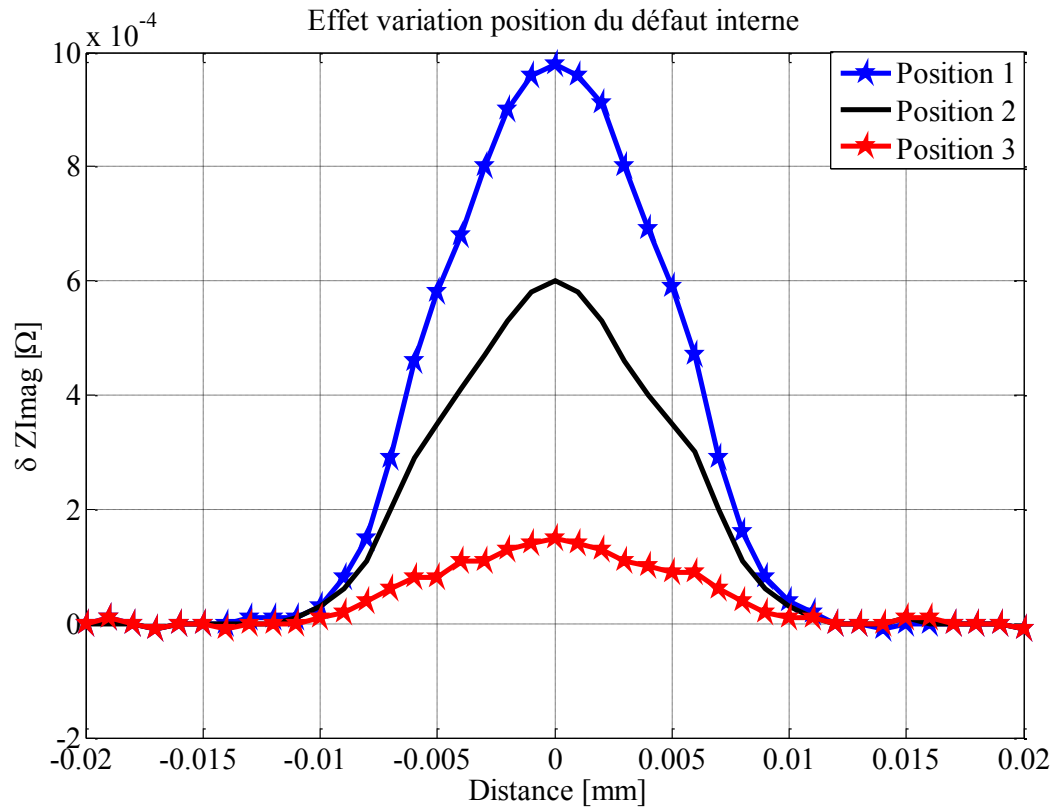


Figure III.16 Effet de variation de la position du défaut sur Z imaginaire.

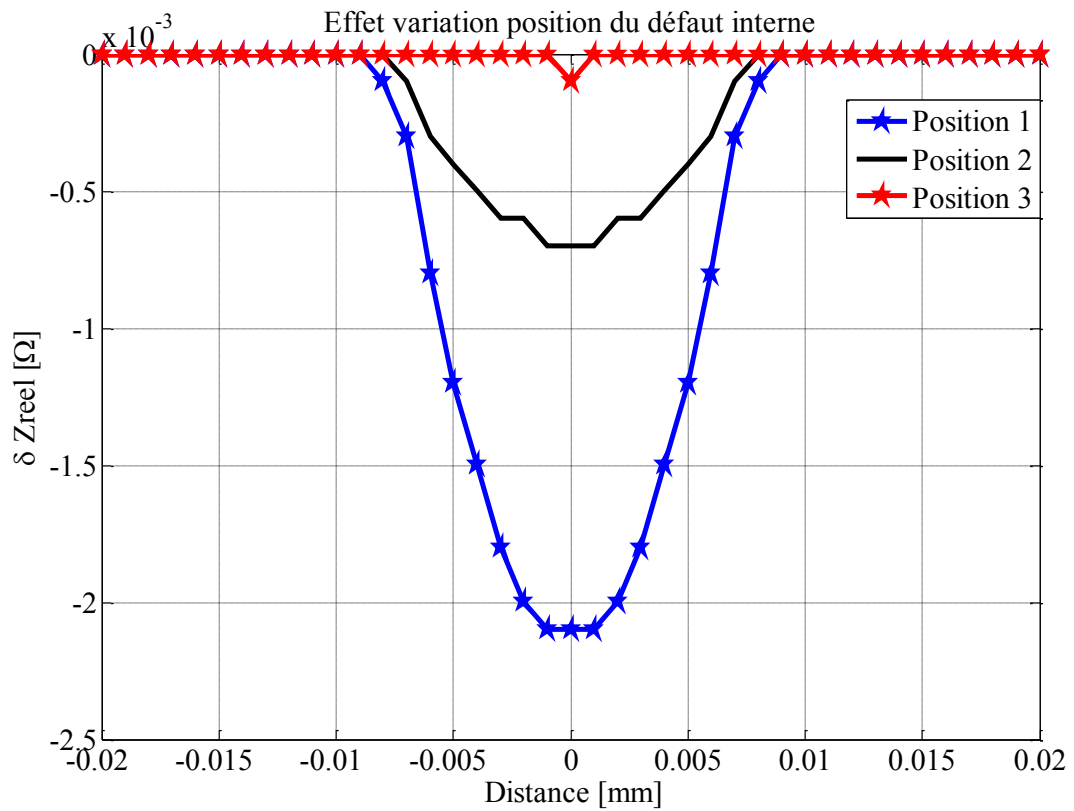


Figure III.17 Effet de variation de la position du défaut sur Z Réelle.

III.4.3.c. effet variation de la fréquence.

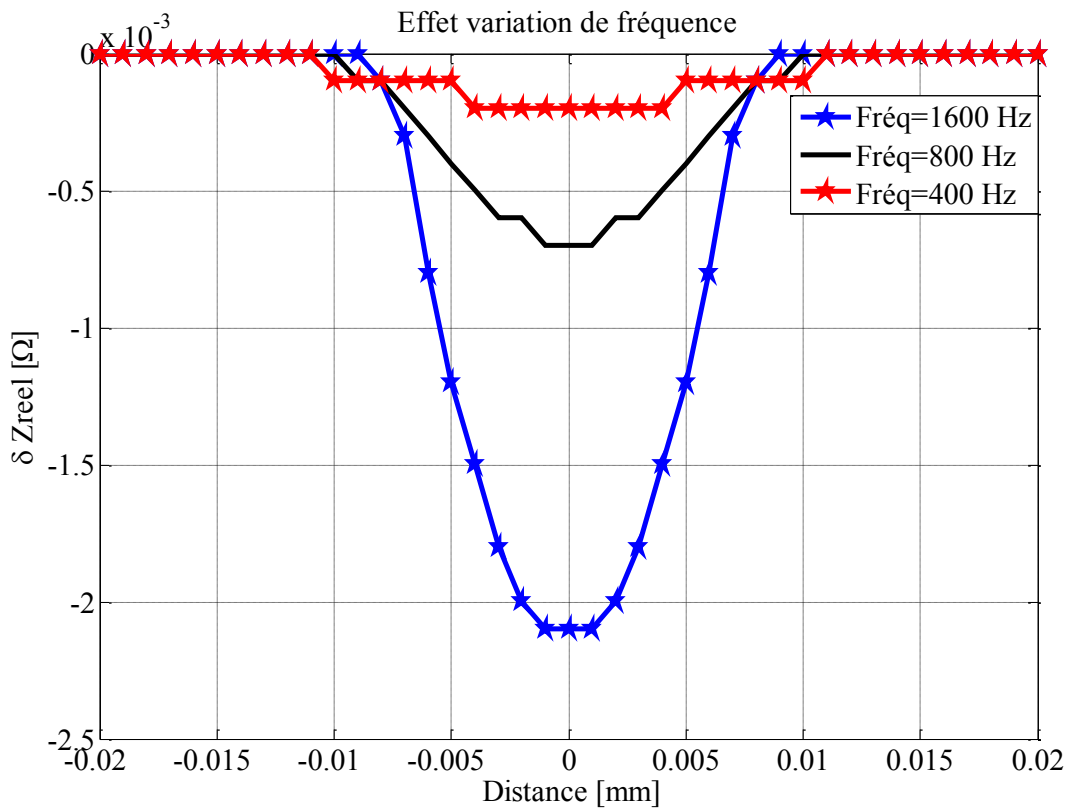


Figure III.18 Effet de variation de la fréquence sur Z imaginaire.

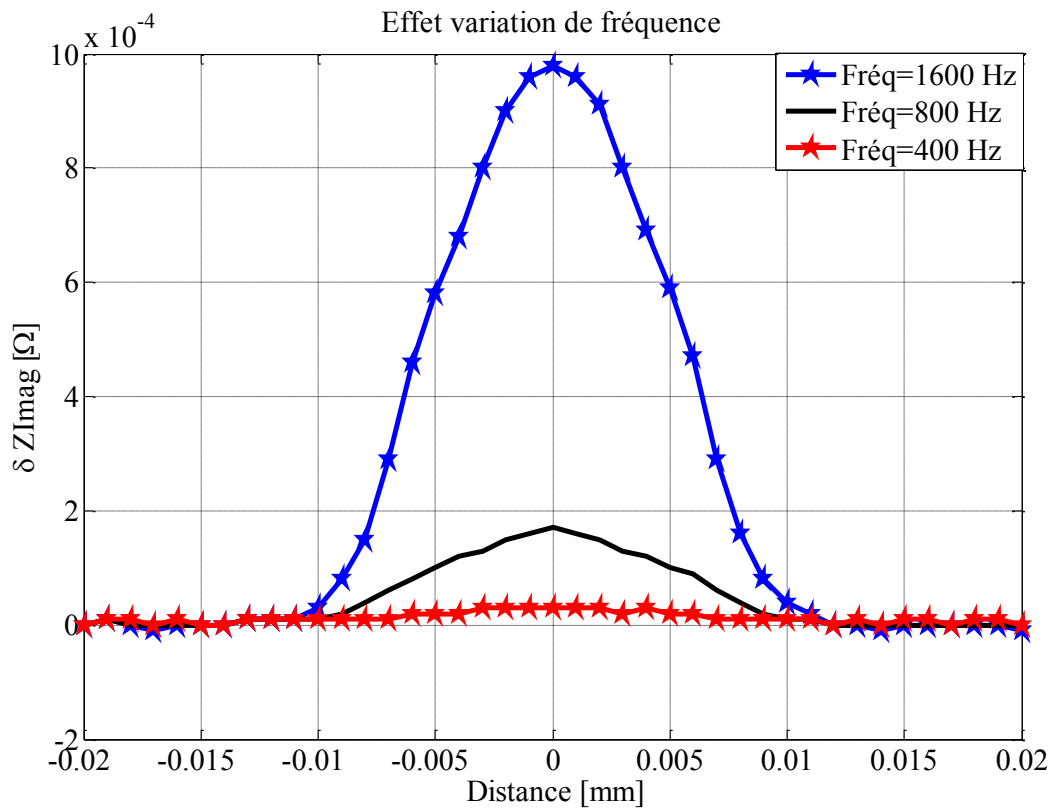


Figure III.19 Effet de variation de la fréquence sur Z imaginaire.

Les Figures (III. 18 et 19) montrent que le signal est proportionnel à la fréquence, et que la fréquence de 1600 Hz est la mieux adaptée car le signal obtenu ne présente pas cassure fréquence optimale).

III.4.3.d. Effet de la largeur et la position du défaut

On se propose d'étudier l'effet mutuel de largeur et la position du défaut.

la figure suivante montre la position des défauts par rapport aux plaques.

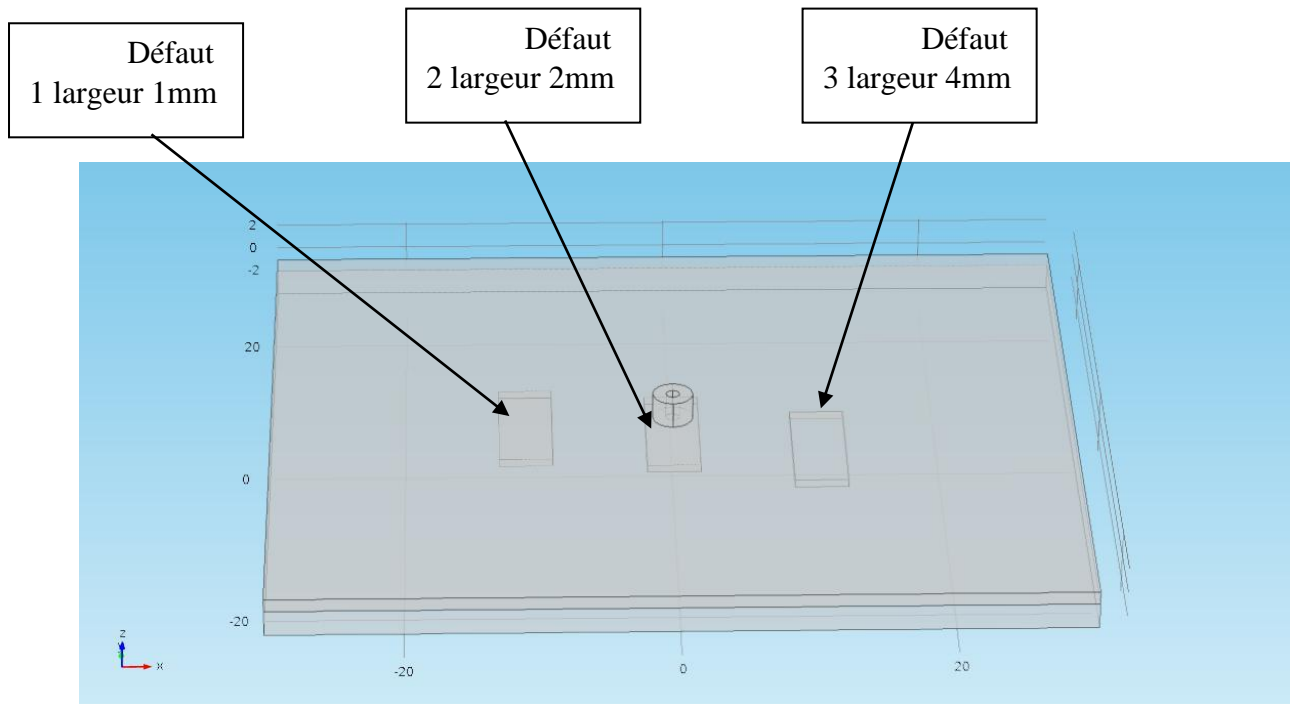


Figure III.20 Positions des défauts de largeurs différentes (1, 2 et 4mm)

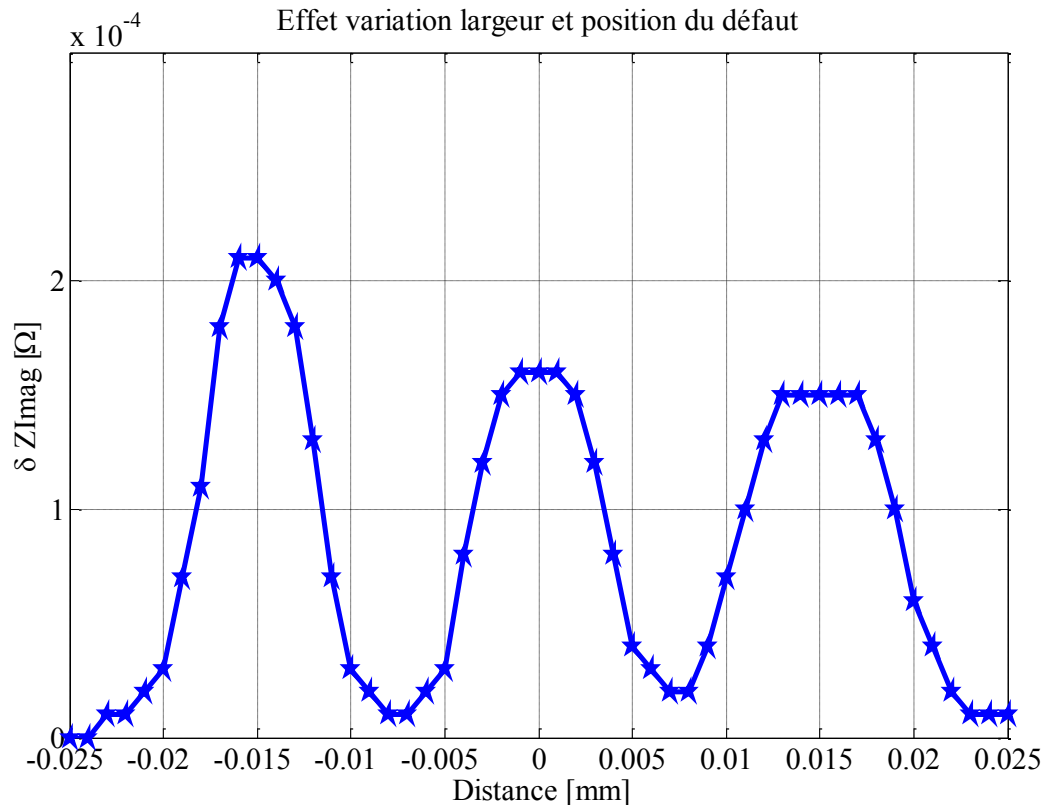


Figure III.21 Effet de variation de la largeur et la position sur Z imaginaire.

On remarque que l'amplitude du signal obtenu est plus importante pour les défauts proches de la surface et que plus le défaut est plus large plus le signal à un sommet qui tend à s'élargir.

III.5. Balayage surfacique par série de bobines en mode multiplexage

Les techniques mettant en œuvre des capteurs multiéléments ou capteurs ECA (Eddy Current Array) permettent de passer du stade de la détection locale à celui de la détection surfacique par analogie avec les méthodes de ressuage et magnétoscopie. En cela les sondes ECA présentent un intérêt ne serait-ce qu'en terme de productivité.

III.2.2 Capteurs multiéléments

La technologie des courants de Foucault multiéléments permet d'exciter et de lier électroniquement plusieurs bobines CF disposées côte à côte dans un même assemblage. Les bobines sont excitées séquentiellement de façon à éliminer l'interférence causée par l'inductance mutuelle (c'est ce qu'on appelle le multiplexage). De cette façon, les bobines travaillent de concert afin de balayer une surface beaucoup plus grande que ne le ferait un capteur mono-élément (Figure III. 1), [5].

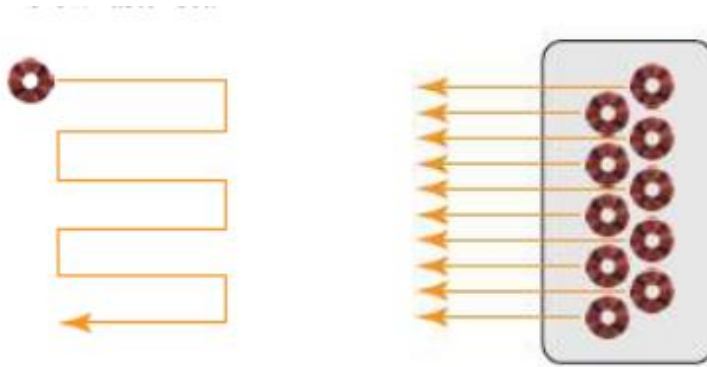


Figure III.22 Balayage d'un capteur mono-élément et multiéléments,.

III.5.1.a. Modèle géométrique

Les 3 défauts sont rectangulaires de largeur 0,25mm et 10mm de long, épaisseur 0,6mm, ils sont disposés sur les 3 positions initialement utilisées et distants de 15 mm chacun

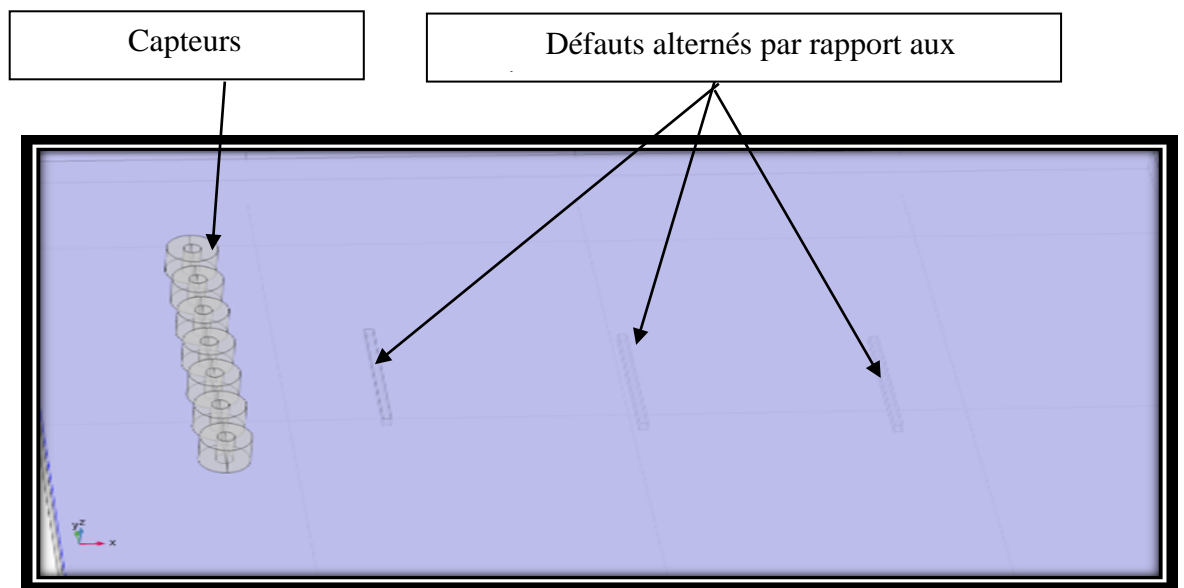


Figure III.23 Modèle géométrique « multiéléments en mode de multiplexage ».

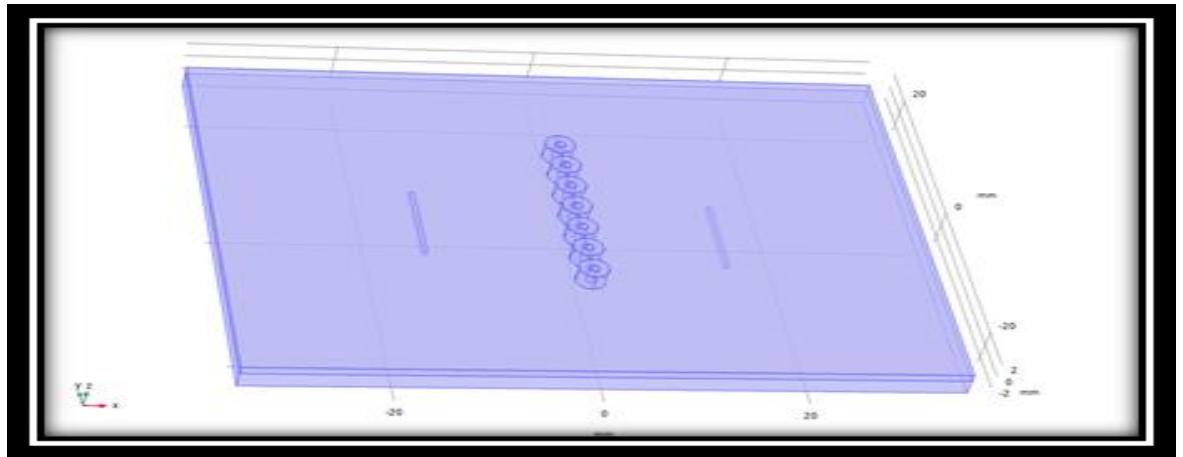


Figure III.24 Vue de la position de défauts 2

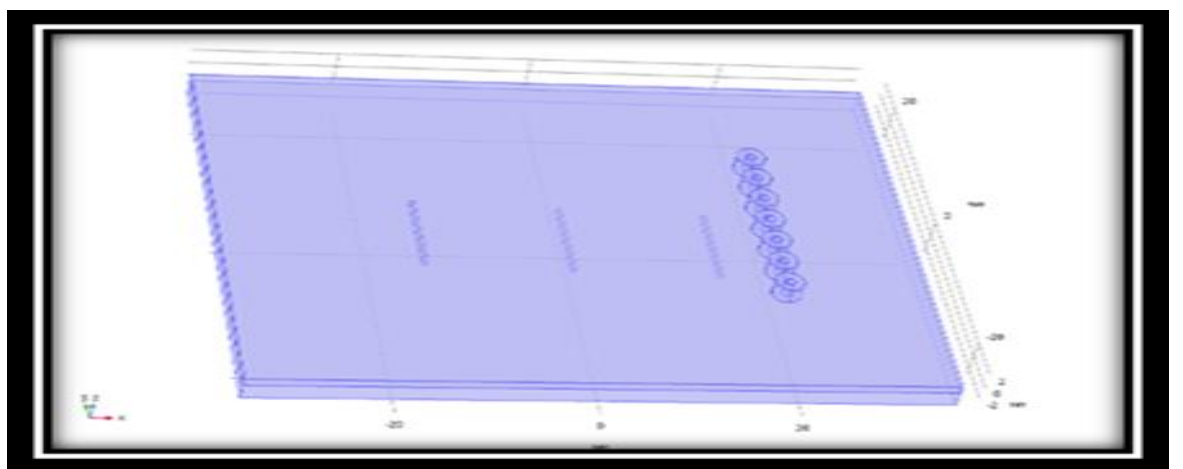


Figure III.25 Vue de position de défauts 3.

III.5.1.b. Maillage du domaine d'étude

la figure (III.26) présente le maillage du modèle proposé .

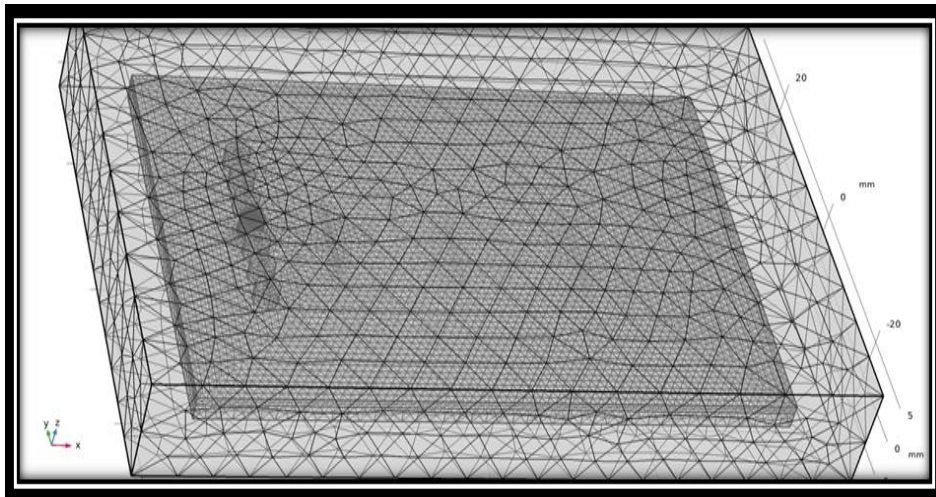


Figure III.26 Maillage domaine d'étude « multiéléments en mode de multiplexage »..

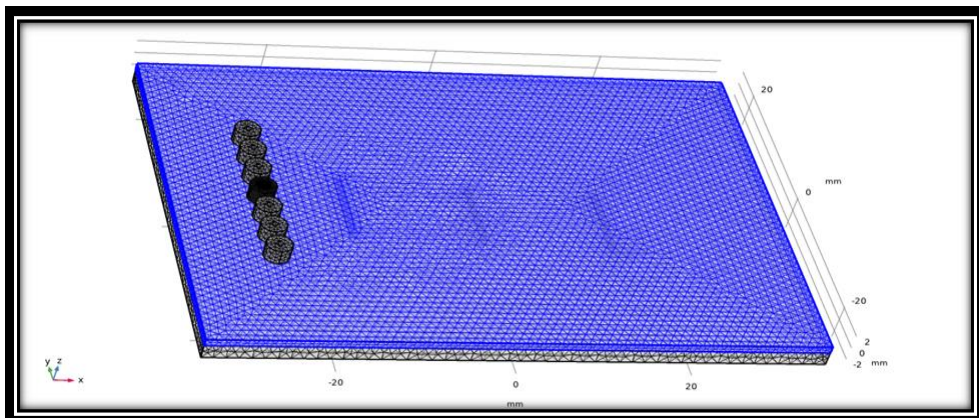


Figure III.27 Zoom du Maillage domaine d'étude« multiéléments en mode de multiplexage »..

III.5.1.c. Scanner des signaux Et imagerie en 3D modèle

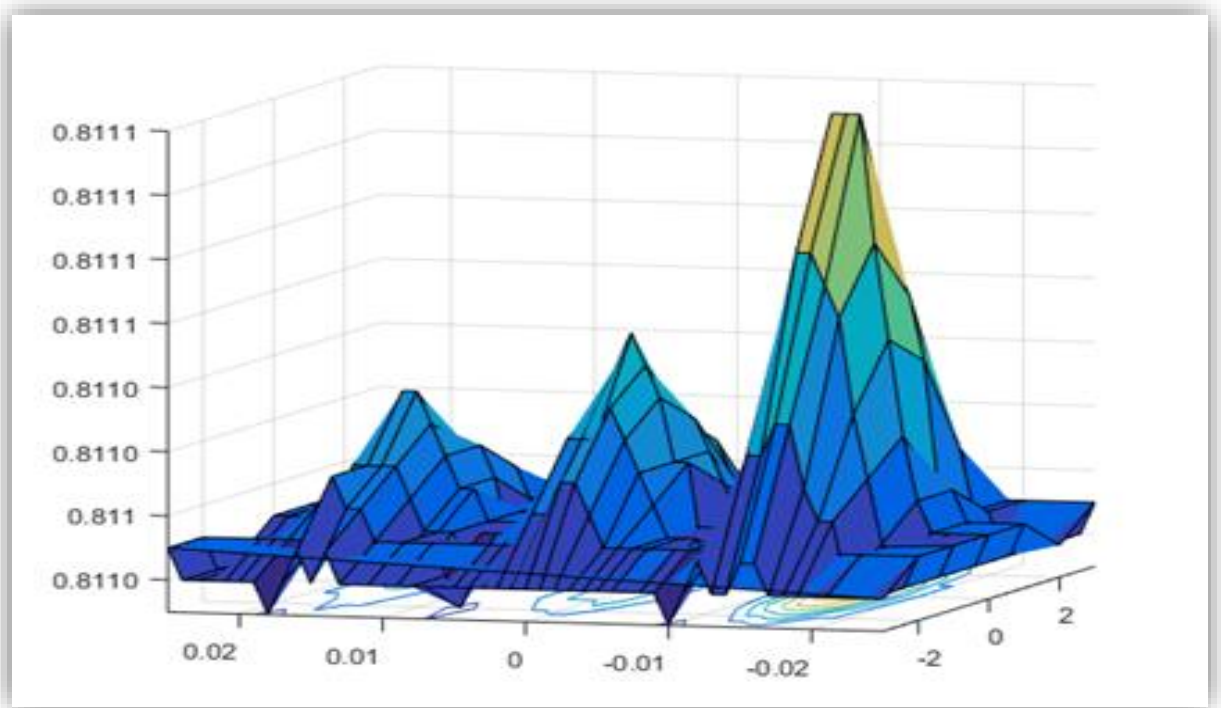


Figure III.28 Imagerie 3 D de réactance

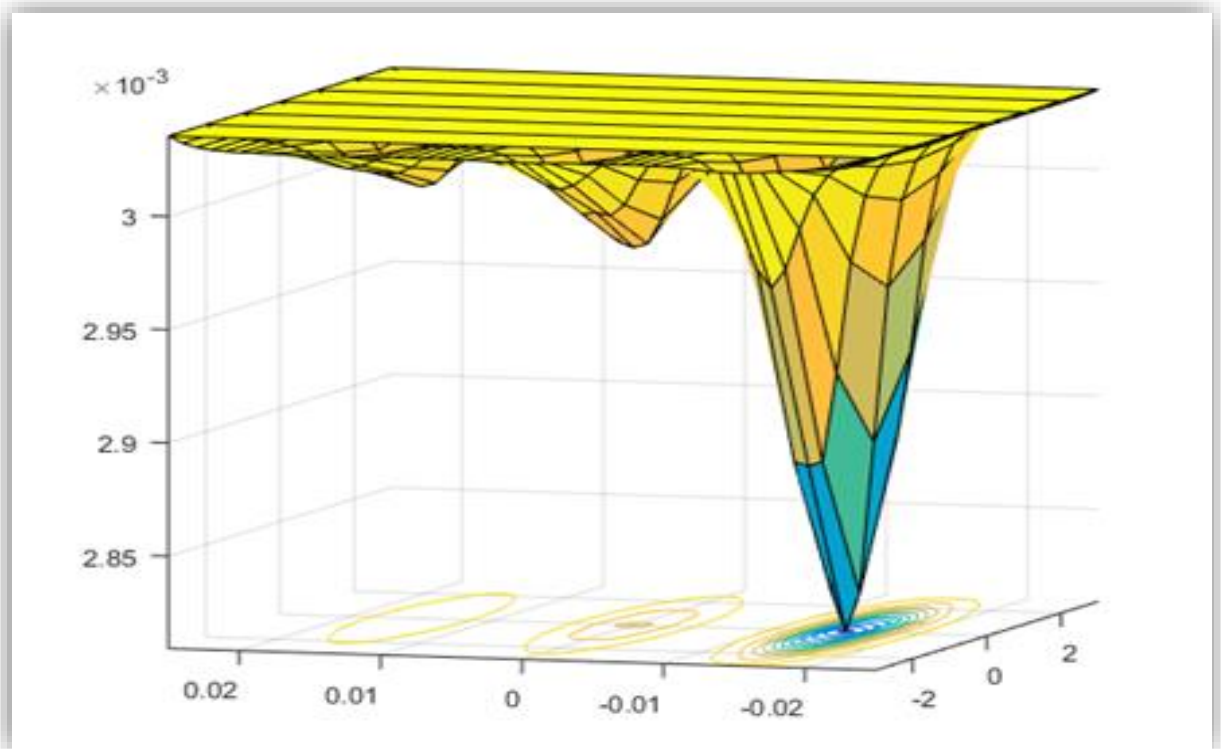


Figure III.29 Imagerie 3 D de résistance

Les Figures (III.28 et 29) montrent clairement l'imagerie en 3D de la réactance et résistance après un balayage surfacique du système proposé de multi capteurs en mode multiplexage de l'amplitude du signal ainsi obtenu est plus importante pour les défauts internes de corrosion qui plus proche de la surface à inspectée.

III.6. Conclusion :

Le CND consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses, ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité humaines et matériel.

Parmi les différentes méthodes de CND, celle des courants de Foucault est très employée pour le contrôle de milieux conducteurs

Après implémentation du système de CND-CF sous COMSOL Multiphasiques, cela nous a permis de simuler en premier lieu la détection de défauts de corrosion d'une part, et d'autre part, mettre en relief l'aspect sur l'utilisation des multi capteurs ce qui permet de contrôler des pièces de surface importante avec un minimum de temps.

La deuxième étape réalisée c'est l'utilisation du mode d'alimentation avec multiplexage permettent ainsi d'éviter l'effet de mutualité entre bobines proches.

Les résultats obtenus s'avèrent de bonne qualité car ils nous ont permis la détection de défaut de corrosion internes, et défauts sous cutanés.

L'imagerie obtenue permet d'avoir un constat global sur la qualité ou l'état des pièces à contrôler.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif visé par ce travail été une Etude et Simulation de la Détection par Courants Foucault de Défauts Internes de Corrosion Cas de Système Bicouches

Ce mémoire est organisé comme suit :

Aux débuts des ces travaux, on a présenté des généralités sur le CND et, Champ d'application et les types des Défauts les et principales méthodes de CND seront rappelées. et nous sommes concentrés sur les différentes technique de CND

Nous avons présenté par la suite un aperçu sur les différents capteurs utilisés en CND-CF ainsi que leurs méthodes de mesure et modes d'excitation, puis nous avons abordé le modèle mathématique et numérique qu'on va utiliser pour modéliser le dispositif, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans le dispositif électrique qui sont les équations de Maxwell. [2]

Les résultats obtenus dans ce mémoire traitent de la modélisation par la méthode des éléments finis sous le logiciel COMSOL Multiphysiques5.6 qui est justement basé sur la MEF.

Ce logiciel est un outil de conception et de modélisation dont l'avantage principal, d'une part, est de ne pas être dédié à un domaine d'application particulier, il rassemble un ensemble d'outils et une bibliothèque de modèles prédéfinis permettant la simulation de tout processus physique pouvant être décrit par des équations différentielles, y compris donc les équations de Maxwell et les problèmes de CND par CF, et d'autre part, il permet de travailler en 2D ou 3D part d'économiser des ressources informatiques en particulier en ce qui concerne le temps de calcul et la mémoire requise pour les simulations, [21].

Quant à la dernière partie elle a été dédiée à la modélisation et simulation en 2D et 3D sous COMSOL Multiphasiques d'un système CND-CF d'une part pour une plaque conductrice munie de défauts internes de corrosion pour un système à deux couches Avant de procéder à cette simulation nous avons validé les modèles proposés en les comparants aux travaux internationaux dans ce domaine.

Nous avons pu

- *Détecter les défauts internes de longueurs et largeurs différentes,*
- *Détecter les défauts internes répartis sur des positions différentes*
- *Mettre en évidence l'effet de la fréquence sur le signal de détection*
- *Obtenir des imageries de la réactance et résistance après un balayage surfacique d'un système multiéléments excité en mode de multiplexage*

Perspectives

Ce travail conduit tout naturellement à envisager un certain nombre de prolongements :

- ✓ *La réalisation d'un essai pratique ;*
- ✓ *Prendre en considération des défauts de forme aléatoire ;*
- ✓ *Utilisation des micro-capteurs sou bobines imprimées afin d'aboutir à la forme circulaire de l'imagerie autour du rivet.*

Bibliographie

- [01] Abdelhak, A. (2018). *"Contrôle non Destructif (CND) : Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault"*. Batna: Université de Batna 2.
- [02] EMMAD, A. e. (2020). *Contrôle Non Destructifs par Capteurs à Courants de Foucault à Champs Magnétique Tournant*. ABD20: Université de M'sila.
- [03].O.Nacima. (2012). *"Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive."*. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [04] .khabale.Marwane. (2019). *Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques*. Université de M'sila.
- [05] .J.Dumont-fillon. (s.d.). *.contrôle non destructif (CND)*. Technique de l'ingénieur.R1400.
- [06] BOUCHALA, T. (2008). « *Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault– Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite –*», *Mémoire de Magister en Electrotechnique*,. Université El hadj Lakhder, Batna,.
- [07] RAMDANE, B. (2009). *Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de*. UNIVERSITE DE NANTES.
- [08] KOHN, E. (2003). *CONTRÔLE NON DESTRUCTIF D'UN MATÉRIAU EXCITÉ PAR UNE ONDE ACOUSTIQUE OU THERMIQUE. OBSERVATION PAR THERMOGRAPHIE*. THESE DE DOCTORAT UNIVERSITE PARIS OUEST NANTERRE LA DEFENSE.
- [09] .M.Mouhamed. (2012). *détection de défauts surfacique par contrôle non destructifs pa courants de foucault en mod absolu*. Université de M'sila.
- [10] Site internet de la COFREND. (s.d.).
- [11] .A.Meddeur. (2019). *.Application des réseaux de neurones pour la caractérisation géométrique et physique d'un plaque conductrice*. Université de wargla.
- [12]. SAFER, A. O. (2014). *Etude et modélisation de capteur à courant de Foucault pour le controle non destructif*. Université de M'sila.
- [13]. MEDJEDEL, K. (2021). *Etude d'un Système de Détection par Courants de Foucault Multiéléments Alimenté en Mode Harmonique Multiplexé Application aux Echangeurs de chaleur*. Université de M'sila.
- [14] W.SLIMANE, [. (2008). *Conception d'un Système Multi Capteur. Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND)*. Université de batna.
- [15] Jérôme Antoni, M. S. (2004). « *Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires* ». SpécialcongrèsSurveillance5, Acoustique &Techniques n°38.

- [16]. M. Riethmuller. (2008). , *L'émission acoustique; applications aux équipements industriels.*, Toulouse, COFREND.
- [17]. BILAL, T. (2018). *Méthodes de contrôle non destructif pour la détection des Défauts dans les tubes sans soudure.* UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.
- [18]. Oussama, B. (2012). *Contrôle non destructif par courants de Foucault.* Université de Msila.
- [19]. Mouldi, R. (2017). *cours Contrôle Non Destructifs.* Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA.
- [20]. MOHAMED, K. (2007). . *Etude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault pour le Contrôle Non Destructifs CND.* . Université de Constantine.
- [21]. B.LAKHDAR, [. (2018). *Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.(Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage).* . . Université de Msila.
- [22] H.BRAHIM. (2021). *Contrôle Non Destructif pour une Structure Multicouches utilisée en Aéronautique par Système de Multi-Capteurs à Courants de Foucault.* Université de Msila.
- [23]. BENHADDA, N. (2015). *Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND).* Batna: Université de Batna 2 .
- [24]. MAOUACHE, B. (2007). *Elaboration de modèles par les Grandeurs Electromagnétiques Couplées. Application au Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault.* Université de setif .
- [25] AMAR.B, [. (2007). *Evaluation des matériaux conducteurs par courant de Foucault pulses.* 26: Grenoble, France.hal-03358594.
- [26] BOUCHALA, T. (2014). , « *développement de méthode rapide pour la résolution des problèmes directs dans les systèmes CND par Courants De Foucault*», thèse de doctorat, . Université El hadjL akhder , Batna.
- [27] .N. Bowler. (2019). «*Eddy-Current Nondestructive Evaluation,*» . Springer Series in Measurement Science and Technology, .
- [28]. Y. Choua. (2010). «*Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault,*» . Université Paris Sud Paris XI, .
- [29]. .Ala-Eddine, L. (2011). « *Etude Et Modélisation De Capteurs En Cnd Par Courants De Foucault :Application A La Détection Des Fissures* » , *Mémoire de Magister, Electricité industrielle* ,. Université de Biskra.
- [30]. Yahya, C. (2009). «*Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault,*» , *Thèse de doctorat, Orsay.* Université Paris Sud - Paris XI, Français.

- [31]. Bilal Hannouf, A. Z. (Juin 2018.). [1] « *Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif* », mémoire de mastère, . Université de Jijel, .
- [32]. Salma, C. (2011). « *modélisation électromagnétique de systèmes multicateurs-pièce à défauts complexe pour le CND par CF* », Mémoire de magister, ., université de TIZI-OUZOU.
- [33]. I. Dufour, M. B. (1994). « *General analysis of inductive sensor based systems* ». . France : J, phy. III.,.
- [34]. A. Benhalima Et A. Saoudi. (2018). « *Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault (Application aux Structures Rivetées Utilisées en Aéronautiques)*, » Mémoire de master,. Université de M'sila, .
- [35] Zhanga, G. (15.6.2006). Inspection of defects in conductive multi-layered structures by an eddy current scanning technique: Simulation and experiments15. china: G27.